

58

Hyvityt

7.10.1976

anvessalla magna cum laude

markk kalio

EI KOTILAINAKSI

SDR-MENETELMÄN SOVELTAMINEN TOIMINTAVERKKOANALYYSIIN

Helsingin
Kauppakorkeakoulun
Kirjasto

1458

Laudatur-tutkielma

Ltt: systeemit

Helsingin kauppakorkeakoulu

syksy 1976

Laatija: Kyösti Anttonen

ESIPUHE

Tässä laudaturtutkielmassa käsitellään toimintaverkkoanalyysin laajentamismahdollisuuksia heuristisen SDR-optimointimenetelmän avulla. Tutkielman idean loi ap. prof. Raimo Keloharju tutkimustensa yhteydessä vuonna 1974.

Tutkielmassa käsitellyn mallin tietokonetekninen ratkaisu on kirjoittajan kehittämä, joten vastuu tuloksista - kuin myös puhtaaksikirjoituksesta - on allekirjoittaneen.

Kiitän Aapo Siljamäkeä avusta numeerisen esimerkin muokkauksessa.

Tutkielman mallia on ajettu Opetusministeriön UNIVAC-1108-tietokoneella: julkiselle vallalle kiitos tuhansista UNIVACin resurssimarkoista.

Kyösti Anttonen

SISÄLLYSLUETTELO

SIVU

1. JOHDANTO	1
1.1 Perinteinen kriittisen polun menetelmä	1
1.2 SDR-menetelmän soveltaminen verkkoanalyysiin	3
1.3 Monen tuotteen malli	5
1.4 Tutkielman sisältö ja raja	6
2. MONEN TUOTTEEN SDR/CPM-MALLI	8
2.1 Päätösmuuttujat	8
2.1.1 Miehitys kullakin aktiviteetilla	8
2.1.2 Tuotteiden aloitusajat	8
2.2 Tavoitefunktio	10
2.2.1 Työhönotto- ja erotuskustannukset	11
2.2.2 Hyvitykset ja sakot	12
2.3 Rajoitukset	12
2.3.1 Työvoimalajin yksikäsitteisyys	12
2.3.2 Päätösmuuttujien rajat	12
2.3.3 Ulkoiset rajoitukset	13
2.4 Suunnitteluhorisontti	13
2.4.1 Monen tuotteen SDR/CPM-malli vs. varastomalli	14
3. NUMEERINEN ESIMERKKI	15
3.1 Esimerkin kuvaus	15
3.1.1 Toimintakaavio rajoituksineen	15
3.1.2 Kustannusfunktio	19
3.2 Tuloksia koeajoista	21
3.2.1 Työvoimarajoituksen merkitys	25
3.2.2 Hyvitysten ja sakkojen vaikutus valmistumishetkiin	27
3.2.3 Paraabelikäyrä työvoiman muutoskustannusten mittana	28
4. MALLITEKNIKKAA	31
4.1 Ratkaisun metodiikkaa	31
4.1.1 FORTRAN-ohjelmoinnin perusteiden kertausta	31
4.1.2 SDR - heuristinen optimointimenetelmä	32
4.1.2.1 Search-rutiinin toiminta	33
4.1.2.2 SDR-menetelmän soveltaminen	34

4.2 Ohjelmointinäkökohtia	36
4.2.1 Optimointi tuote kerrallaan	36
4.2.2 Moduilit	37
4.2.3 Työvoimataulukko	39
4.2.4 ATK-teknisiä yksityiskohtia	41
5. OPPIMISPROSESSIN MUKAAN OTTAMINEN	43
5.1 Oppimiskäyristä	43
5.2 Oppimiskertoimet	44
5.3 Numeerinen esimerkki	45
6. YHTEENVETO	47
KIRJALLISUUTTA	49
LIITE: AJOESIMERKKI	51

1. JOHDANTO

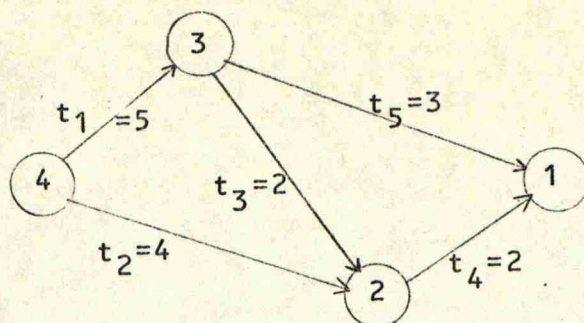
Toimintaverkkomenetelmien perusteet kehitettiin aikoinaan käytännön suunnittelutilanteissa. Erillisten suurprojektien ajoitus suunnittelun apureina syntynsä näkivät kriittisen polun menetelmä (Critical Path Method, CPM), sekä PERT (Program Evaluation and Review Technique). Näissä menetelmissä on sama perusidea: suuri kertaprojekti jaetaan osaprojekteihin. Osatehtävien suoritusjärjestys ei ole vapaa, vaan määrätyn osatehtävän aloittamiseksi edellytetään, että tietyt aiemmat työvaiheet on jo saatu läpiviedyiksi. Tehtäväinkulkua kuvataan verkkokaavioilla.

PERT on CPM:ää laajempi, sillä siinä otetaan huomioon osaprojektien kestoaikoihin liittyvä epävarmuus. Menetelmällä on myös verkkokaaviotekniikkaan liittyviä, semanttisia eroja. Näistä ei tutkielmassa välitetä, vaan on poimittu mieleiset termit ja kaaviotekniikka. Kun stokastiikkaa ei kuitenkaan mainitulla tavalla ole huomioon otettu, puhutaan vastedes vain kriittisen polun menetelmästä.

1.1 Perinteinen kriittisen polun menetelmä

Kuvan 1-I yksinkertainen projektikaavio esittää ruuhen valmistusta viilaten ja höyläten. Numeroiduilla ympyröillä merkitään osatehtävien alkamis- ja päättymiskohtia. Itse tehtäviä kuvaavat näiden ympyröiden väliset nuolet. Kuvion ympyröitä kutsutaan solmuiksi ja nuolia aktiviteeteiksi.

Projektin läpivienti etenee vasemmalta oikealle. Ruuhi-esimerkin työvaiheet on lueteltu Taulukossa 1-1.



Kuva 1-1. Verkkokaavio ruuhen valmistuksesta viilaten ja höyläten.

Aktiviteetti Tehtävä:

4-3	Sisätilojen höyläminen
4-2	Ulkopinnan -"-
3-2	Tapinreikien ja aironhankojen viilaus
3-1	Sisätilojen viilaus
2-1	Ulkopinnan -"-

Taulukko 1-1. Esimerkkiverkon tehtäväluettelo

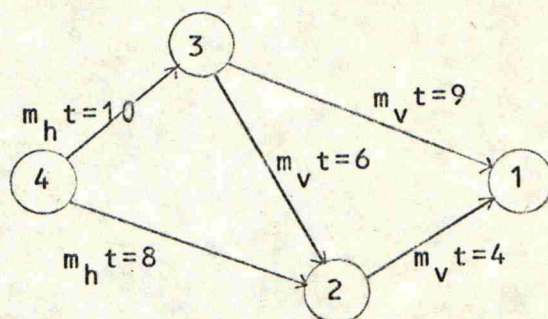
Kaavion mukaan työ etenee siten, että sisätilojen (3-1) sekä tapinreikien viilaus (3-2) eivät voi alkaa, ennen kuin ruuhen sisätilat on ensin höylätty (4-3). Vastavasti ulkopinnan viilausta (2-1) ei saa aloittaa, ennen kuin ulkopinnan höyläys (4-2) on saatu päätökseen ja tapinreiät (3-2) on viilattu. Koko projekti on loppu - ruuhi on valmis - kun sekä aktiviteetti 3-1 että aktiviteetti 2-1 ovat kumpikin loppuunsaatut.

Aktiviteettien viereen on merkitty t-symbolein kuhunkin työvaiheeseen arviolta kuluva aika. Kaavioon liittyvä kriittinen polku on tällöin polku 4-3-2-1, sillä siihen kuluva aika on $5+2+2 = 9$ aikayksikköä, esimerkissämme

viikkoa. Kriittisen polun kulkemiseen kuluva aika on samalla koko projektin läpiviemiseen kuluva aika, sillä aktiviteetti 3-1 voidaan aloittaa jo hetkellä 5, kun taas aktiviteetti 2-1 päästään alkamaan vasta hetkellä $7 = \max \{4, 5+2\}$.

1.2 SDR-menetelmän soveltaminen verkkoanalyysiin

Kuvassa 1-II ja Taulukossa 1-2 äskeinen ruuhentekoesimerkki esitetään hieman muunnettuna. Työnkulku ja solmujen numerointi ovat muuttumattomat, mutta nyt aktiviteettien kestot ilmaistaankin miestyöviikkoina.



Kuva 1-II. Ruuhentekokaavio muunnettuna.

<u>Aktiviteetti</u>	<u>Kesto</u>
4-3	10 höylääjäviikkoa
4-2	8 -"-
3-2	6 viilaajaviikkoa
3-1	9 -"-
2-1	4 -"-

Taulukko 1-2. Aktiviteettien kestot miestyöviikkoina.

Kestoja tulkitaan nyt siis siten, että sisätilojen höyläystöihin (4-3) kuluisi yhdeltä mieheltä 10 viikkoa, tai kuten Kuvan 1-I tapauksessa, kahdelta mieheltä 5

viikkoa:

$$t_1 = \frac{10 \text{ m}_h t}{2 \text{ m}_h} = 5 \text{ t.}$$

Esimerkkikaaviot 1-I ja 1-II ovat identtiset, kun miehitykset ovat: aktiviteeteilla 4-3 ja 4-2 vastaavasti 2 ja 2 höylääjää, ja aktiviteeteilla 3-1, 3-2 ja 2-1 vastaavasti 3, 3 ja 2 viilaajaa.

Entä jos sisätiloja höyläämään voitaisiinkin panna 10 miestä? Suoritus aika olisi tällöin

$$t_1 = \frac{10 \text{ m}_h t}{10 \text{ m}_h} = 1 \text{ t eli 1 viikko.}$$

Kun muut tekijät eivät muutu, polun 4-3-2-1 läpimenoaika on $1+2+2 = 5$ viikkoa, ja polun 4-2-1 läpimenoaika $4+2 = 6$ viikkoa. Lisäämällä resursseja kriittiselle polulle projektin läpimenoaika lyhennetään, esimerkissämme 9 viikon sijasta 6 viikkoon. Lisäksi, niin kuin esimerkiksi, kriittinen polku saattaa muuttua kokonaan toiseen kohtaan.

Jones ja Taubert ovat konsruoineet SDR-optimointimallin^{*)} projektin optimaalisen miehityssuunnitelman löytämiseksi, kun tunnetaan kunkin aktiviteetin kesto miestyöviikkoina (-päivinä, -kuukausina, tms.). Päätösmuuttujia ovat tällöin miehitykset kullakin aktiviteetilla. Tavoitteena on projektin mahdollisimman aikainen läpivienti, kun samalla

*) Jones(4) ja Taubert(11).

Esimerkki myös Buffa - Taubertissa(1) s. 526...531.

SDR-menetelmästä lähemmin luvussa 4.

minimoidaan epätasaisesta työvoimaresurssien käytöstä syntyviä kustannuksia.

Rajoituksia ovat ensinnäkin miesten lukumäärän maksimi- ja minimiarvot kullakin aktiviteetilla. Nämä määrätään siten, että ryhmäkoon ja suoritusajan välinen riippuvuus pysyy lineaarisena annetulla välillä. Toisaalta liitetään mukaan rajoitus, joka ottaa huomioon enimmäismäärän miehiä/työvoimalaji, jonka projekti voi saada käyttöönsä.

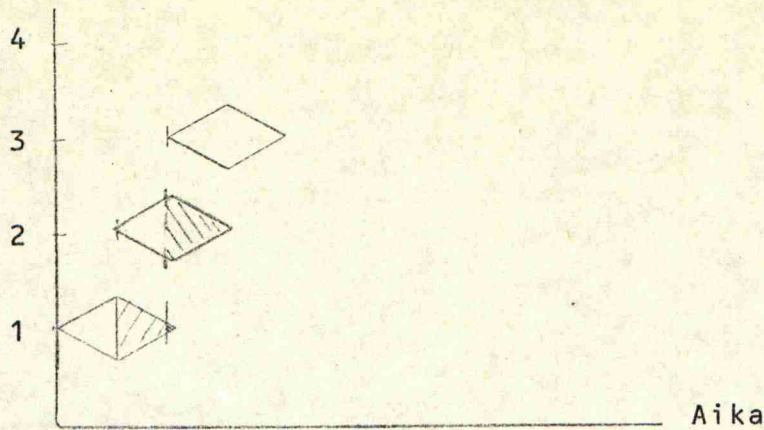
Laajennetuissa malliversioissa otetaan huomioon ylitöiden mahdollisuus, tai ajoituspäätösten säätely, tai molemmat. Perusversiossa kukin aktiviteetti ajoitetaan alkavaksi heti kun se vain on mahdollista. Ajoituspäätösten säätelyllä voidaan käyttää hyväksi erityisesti kriittisen polun ulkopuolelle kuuluvien aktiviteettien joutoaikaa. Kummastakin laajennuksesta tulee malliin lisää yksi päätösmuuttuja aktiviteettia kohden. Mallin päätösmuuttujien määrä on siis - version mukaisesti - aktiviteettien määrä kerrottuna yhdellä, kahdella tai kolmella.

1.3 Monen tuotteen malli

Esimerkkinne veneveistämö on saanut tilauksen 30 ruuhesta. Veistämö ei työvoiman vähyyden ja tilaongelmien vuoksi pysty valmistamaan kaikkia ruuhia yhdellä kertaa, vaan on sovittu, että ruuhet toimitetaan sitä mukaa kuin ne valmistuvat. Kuvan 1-II toimintaverkko pätee siis toistuen 30 kertaa. Edelleen, Kuvasta 1-II huomaamme, että höylääjät vapautuvat ennen ruuhen valmistumishetkeä. He voivatkin siirtyä tässä vaiheessa seuraavan ruuhen kimppuun. Syntyvää suunnittelutilannetta havainnollistaa Kuva 1-III.

Toimintaverkon viivoitettu alue tarkoittaa sitä osaa ruuhesta, joka on vielä kesken seuraavaa jo aloiteltaessa. Jonesin - Taubertin malliin^{*)} verrattuna tulee kutakin

^{*)} Nimitys kirjoittajan keksimä. Käytetty lyhyiden vuoksi.



Kuva 1-III. Useita ruuhia yhtäikaa valmistuksessa.

tuotetta varten päätettäväksi tuotteen aloitusajankohta, muiden päätösmuuttujien lisäksi. Jos Jonesin - Taubertin mallissa on J kpl päätösmuuttujia, niin n kappaleen monituotemallissamme on täten $n \times (J+1)$ päätösmuuttujaa.

Mainittu 30 ruuhien tilaus on esimerkkimme yritykselle suururakka. Viimeisten ruuhien valmistuminen liukuu kauas tulevaisuuteen. Puutteellinen ennakkotietämys haittaa arvioiden tekoa tulevaisuudesta. Mallin dimensioikin paisuu suureksi, kun yritetään löytää optimaalinen miehityssuunnitelma kerralla koko tilauksen ruuhijoukolle. Näistä syistä saattaa olla aiheellista rajoittaa tähtäyksen pituutta: otetaan käyttöön suunnitteluhorisontin käsite, niin kuin monikautisissa varastomalleissa. Palaamme kysymykseen luvussa 2.

1.4 Tutkielman sisältö ja rajaus

Tässä tutkielmassa tarkastellaan kappaleen 1.3 tilanteeseen kirjoittajan rakentamaa tietokonemallia. Luvussa 2 käydään mallin periaatteet uudelleen läpi, kappaletta 1.3 tarkemmin. Luvussa 3 tarkastellaan mallin tekemiä päätöksiä ja käyttäytymistä numeerisen esimerkin valossa. Luvussa 4 kerrotaan käytetyn "Search Decision Rule" -optimointimenetelmän perusteista ja mallin ohjelmointitekni-

ratkaisun perusteista. Luvussa 5 liitetään mukaan tarkasteluun oppimisprosessi vaikutuksineen. Luvussa 6 esitetään yhteenveto.

Tutkielman malli on deterministinen. Tulevaisuus oletetaan tunnetuksi. Esimerkkien numerotiedot käsitellään annettuina. Niitä ei sen mukaisesti enemmälti perustella: pääpaino on mallin periaatteiden ja toiminnan havainnollistamisella. Näkökulman voidaan sanoa olevan vahvasti mallitekkinen.

2. MONEN TUOTTEEN SDR/CPM -MALLI

Malli on, kuten aiemmin jo todettiin, Jonesin - Taubertin mallin laajennus monen tuotteen tapaukseen. Painotettakoon seikkaa, joka käy ilmi johdantoluvun tekstistä: Tuoterakenne pysyy muuttumattomana. Verkkokaavio kuvataan mallille vain kerran.

2.1 Päätösmuuttujat

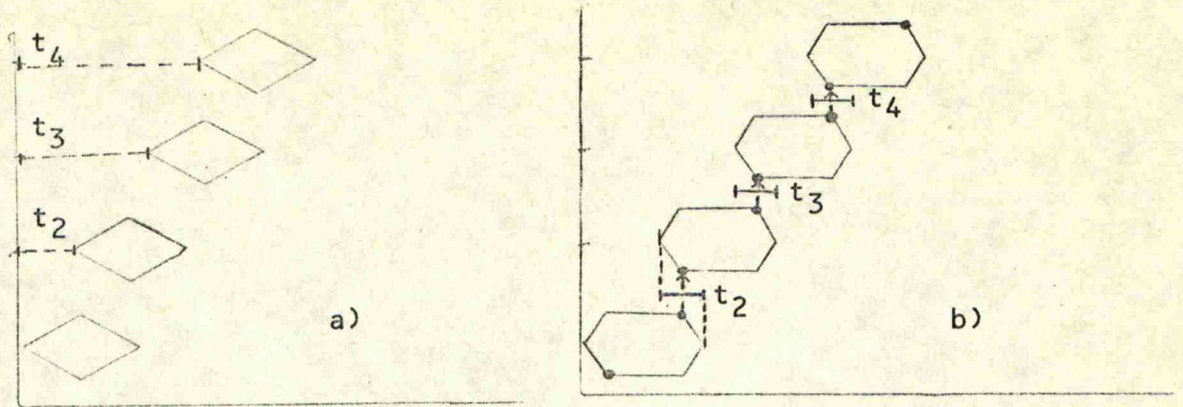
Tutkielman malliversiossa ei ole mukana ylitöiden mahdollisuutta, kuin ei myöskään aktiviteettien ajoitusten säätelyä. Ne olisi kuitenkin helppo lisätä malliin. Päätösmuuttujia ovat siis miehitys kullakin aktiviteetilla ja kullakin tuotteella, sekä tuotteiden aloittamisajankohdat. Jos aktiviteetteja on a kpl, ja optimoitavana on h tuotteen suunnitteluhorisontti, niin mallissa on päätösmuuttujia $h \times (a+1)$ kpl.

2.1.1 Miehitys kullakin aktiviteetilla

Aktiviteettien kestot ilmaistaan miestyöaikayksiköissä. Vaihtelemalla työryhmän kokoa aktiviteetin kestoaikaa voidaan muuttaa. Tätä kautta vaikutetaan toisaalta tuotteen läpimeno-aikaan, toisaalta työvoimatilanteeseen.

2.1.2 Tuotteiden aloitusajat

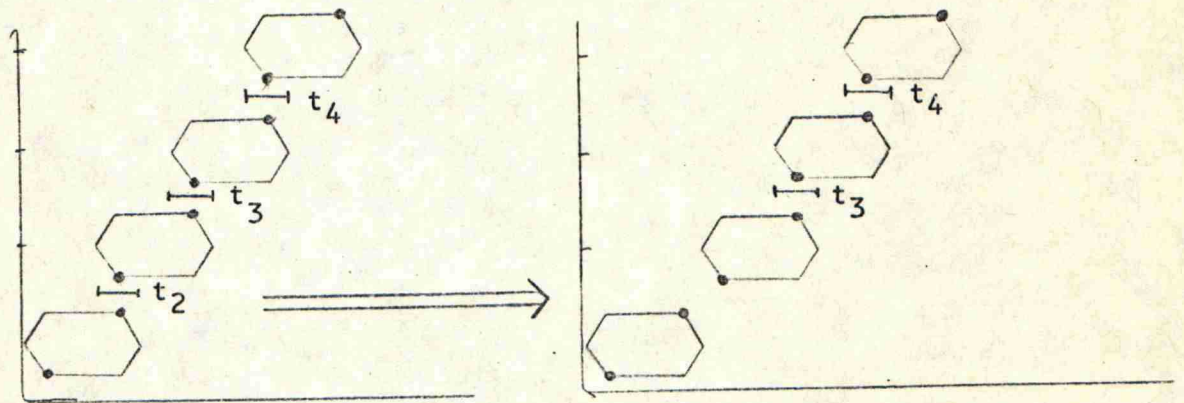
Yksinkertaisinta olisi asettaa tuotteiden aloittamisajankohdat vapaiksi päätösmuuttujiksi Kuvan 2-Ia tapaan. Katso- taanpa kuitenkin Kuvaa 2-Ib. Siinä eri tuotteiden toiminta- verkkoja kytkevät eräänlaiset "dummytehtävät", jotka rajoittavat tuotteiden keskinäistä valmistusjärjestystä. Kuvan 2-I a-kohdassa t -symbolein merkityt janat tarkoittavat sel-



Kuva 2-I. Aloitusajat vapaina ja riippuvina päätösmuuttujina.

laisinaan aloittamishetkiä. Kohdassa b t-janat edustavat sitä liukumavaraa, jonka verran tuotteen aloitusta voidaan siirtää myöhemmäksi kuin kuvan tilanteessa. (Kuvassa tuotteet 2, 3 ja 4 on ajoitettu aikaisimpaan mahdolliseen hetkeen.)

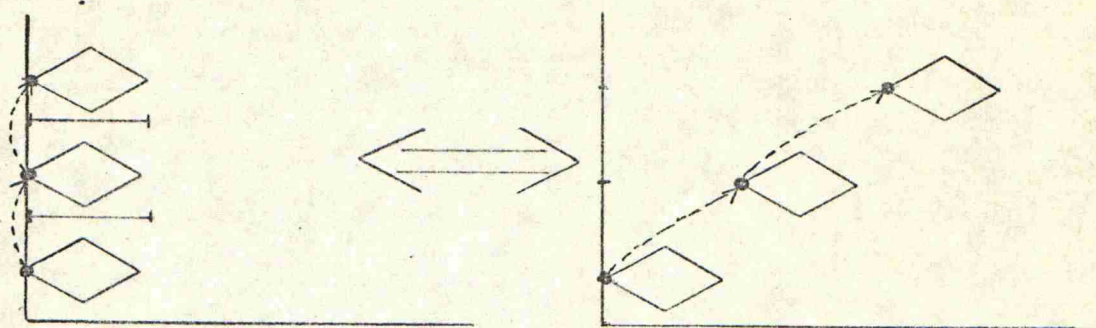
Huomattakoon, että liukumavaran käyttö kertaantuu jäljempänä oleviin tuotteisiin: tuotteen 2 liu'uttaminen siirtää koko perässä tulevaa letkaa kuvassa 2-II.



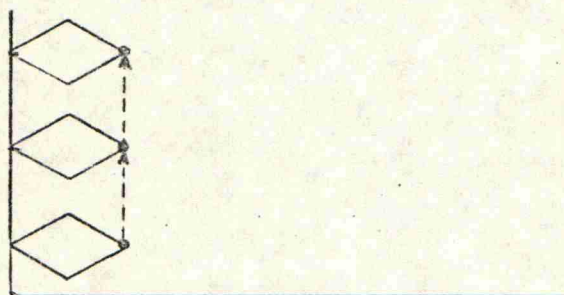
Kuva 2-II. Liukuman kertaautuminen.

Mallille kuvatunlainen sidonnaisuus kerrotaan määrittelemällä ns. kriittiset solmut, joita Kuvissa 2-Ib ja 2-II on korostettu. Nämä solmut määräävät toimintaverkoista sellaiset osat, joita ei voi olla valmistusprosessin alaisena enemmän kuin yksi kerrallaan.

Määrittämällä kriittiset solmut päällekkäin ensimmäiseen solmuun saadaan aikaan Kuvan 2-Ia tilanne, jossa tuotteiden valmistus voi vaihdella täysin samanaikaisesta täysin eriaikaiseen. Määrittämällä toimintaverkon viimeinen solmu kriittiseksi solmuiksi pakotetaan valmistusprosessit samanaikaisiksi.



a) Aloitusajat vapaat



b) Samanaikaisuus pakollinen

Kuva 2-III. Aloitusaikojen ääritapaukset.

2.2 Tavoitefunktio

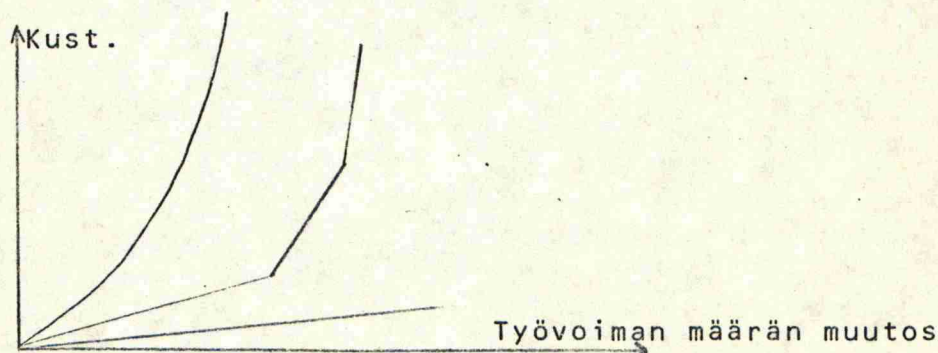
Tavoitefunktio muodostuu kahdesta kustannustekijästä, joiden summaa pyritään minimoimaan. Epätasaisesta työvoiman käytöstä syntyy työhönotto- ja erotuskustannuksia. Toiseksi, tuotteiden valmistumisen viivästyminen aiheuttaa myöhästymissakkoja, kun taas suunniteltua aiempi valmistuminen tuottaa hyvitystä.

Mallissa on rutiinit myös palkkakustannusten laskemista varten. Tässä tapauksessa niillä ei ole merkitystä. Jos nimittäin joku aktiviteetti vaatii 10 miestyöviikkoa, ja palkkakustannukset ovat 20 rahaa/miestyöviikko, niin palkkakustannukset ovat tälle aktiviteetille yhteensä 200 rahaa riippumatta siitä, kuinka monen miehen kesken rahat jaetaan. Eri asia olisi, jos mallissa olisi mahdollisuus ylitöiden käyttöön, ja ylitöistä maksettaisiin korotettua palkkaa.

2.2.1 Työhönotto- ja erotuskustannukset

Tutkielmassa käytetään termiä työhönotto- ja erotuskustannukset, ikään kuin yritys koko ajan palkkaisi työvoimaa tarpeen vaatiessa, ja erottaisi sitä hiljaisempana aikana. Tämä voidaan tulkita niinkin, että yritys vain pyrkii käyttämään olemassa olevia resurssejaan mahdollisimman tasaisesti. Palkkaus- ja erotuskustannuksilla tällöin tarkoitetaan vaihtoehtoista käytöstä menetettyjä tuottoja.

Vaikka vaihtoehtoista käyttöä ei olisikaan, mutta silti erottamisiin ei mentäisi, työhönotto- ja erotuskustannuksilla voitaisiin tarkoittaa yritysjohtoon tuntemaa vastenmielisyyttä vaajaatyöllistämistä kohtaan. Kustannukset olisivat tällöin subjektiivisia. Joka tapauksessa, kustannusfunktion tyyppi on SDR-mallissa vapaa: kuvassa 2-IV on erilaisia vaihtoehtoja. Kustannuskäyrä voi olla lineaarinen, paloittain lineaarinen, tai vaikka joku vapaanmuotoinen korkeamman asteen käyrä.



Kuva 2-IV. Kustannusfunktion tyyppi.

2.2.2 Hyvitykset ja sakot

Työhönotto- ja erotuskustannusten tapaan hyvityksiä ja sakkoja voidaan tulkita eri tavoin. Ne voivat perustua tehtyihin sopimuksiin, vaihtoehtoiskustannusajatteluun, tai sitten vain subjektiivisiin näkemyksiin. Ilman vitsaa ja porkkanaa malli saattaisi ruveta venyttämään valmistumisaikoja työvoiman käytön tasoittamiseksi: hyvityksillä ja sakoilla pyritään pitämään ratkaisu koossa. Mallille annetaan optimointia varten tavoitevalmistumisaajat merkkipaaluiksi. Tässäkin tapauksessa, niinkuin SDR-mallissa yleensäkin, kustannusfunktion tyyppi on vapaa.

2.3 Rajoitukset

2.3.1 Työvoimalajin yksikäsitteisyys

Tuotteen verkkokaavio on laadittava siten, että aktiviteetille osoitetaan yhtä ainoaa, tiettyä työvoimatyyppeä. (Viilaajat ja höylääjät eivät voi korvata toisiaan ruuhiesimerkissä.) Toisaalta, aktiviteetille voidaan kyllä osoittaa "0-töyvoimaa", jos on kysymyksessä ns. dummytehtävä. Jos kuitenkin aktiviteetille ilmoitettu kesto > 0 , niin se tarkoittaa suoraan kestoa ajassa. Tällöin sitä ei voi muuksi muuttaa, vaan kesto aika on vakio.

2.3.2 Päätösmuuttujien rajat

Käytetty SDR-ratkaisurutiini vaatii kullekin päätösmuuttujalle ala- ja ylärajan, joiden välille sallittu ratkaisu voi sijoittua. Miehityspäätösten ala- ja ylärajat määrätään siten, että aktiviteettien keston ilmoittaminen miestyöaika-yksiköissä pysyy mielekkäänä, ts. ryhmäkoon ja ajassa mitatun keston riippuvuus pysyy lineaarisena.

Ajoituspäätöksiin vaikutetaan toisaalta tehdyillä miehityspäätöksillä kriittisten solmujen kautta, toisaalta kappaleen

2.1.2 liukumuuttujalla. Tämän päätösmuuttujan malli luo sisäisesti, ilmoitettujen kriittisten solmujen perusteella.

2.3.3 Ulkoiset rajoitukset

Ulkoisilla rajoituksilla tarkoitetaan tässä rajoituksia, jotka eivät liity itse tuotteen valmistusrakenteeseen. Näistä on malliin sisällytetty työvoiman niukkuuden huomioon ottava rajoitus: kutakin työvoimalajia kohti tunnetaan maksimimäärä miehiä, joka voi olla samanaikaisesti sijoitettuna eri työkohteisiin.

Työvoiman niukkuusrajoitus sisällytetään malliin liittämällä tavoitefunktioon uusi sakkofunktio. Jos ratkaisurutiinin ehdottamasta työvoimapolitiikasta seuraa, että tietyssä ajan hetkenä olisi sijoitettu työkohteisiin tämän maksimin ylittävä määrä miehiä, sakkofunktio painostaa ratkaisurutiinia etsimään parempia vaihtoehtoja.

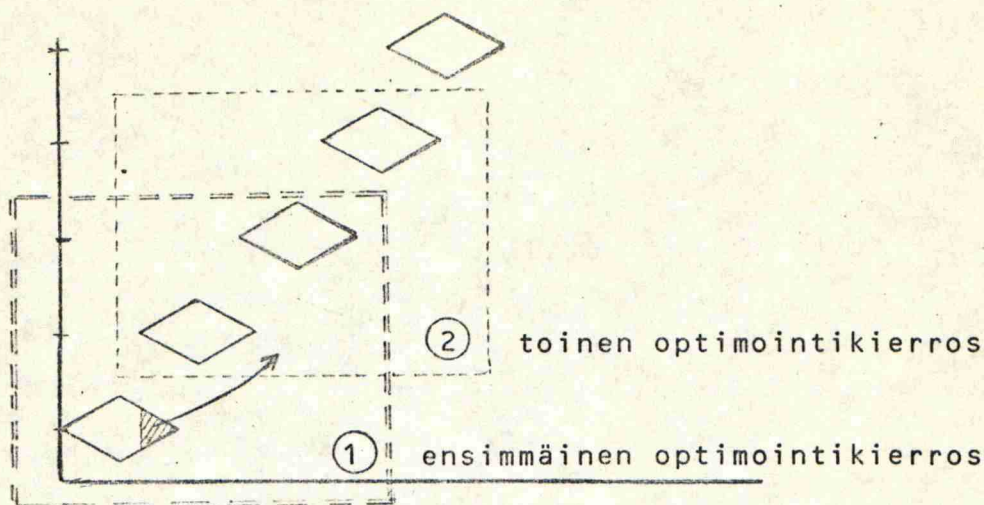
2.4 Suunnitteluhorisontti

Tutkielman lähtökohtatilanteen mukaisesti tilattu tuote on sellaista suuruusluokkaa, että kunkin "kappaleen" valmistuksen ajoitus suunnitelma tehdään kuten suurelle kertaprojektille. Kun valmistettavien tuotteiden määrä nousee, mallin päätösmuuttujien määrä paisuu suureksi.

Kaikkia tuotteita ei valmisteta samanaikaisesti, joten suunnitteluhorisonttia voidaan puoltaa: jäljempänä tuleville tuotteille ehditään tekemään suunnitelmat myöhemminkin. Kun viimeisen tuotteen valmistus saattaa liukua kauas tulevaisuuteen, voi puutteellinen ennakkotietämys tulla haittaamaan. Tällöin ei ole hyödyllistä kurkottaa kovin kauas tulevaisuuteen, jos sitä ei kerran kunnolla tunneta.

Kuva 2-V havainnollistaa kolmen tuotteen suunnitteluhorisonttia. Tuotteen 1 päätöksiä tehtäessä otetaan huomioon -

perspektiivin vuoksi - tuotteet 2 ja 3. Tuotteen 1 osalta päätökset toteutetaan. Tuotteen 2 päätöksiä tehtäessä otetaan perspektiiviksi tuotteet 3 ja 4. Lisäksi pidetään mielessä Tuotteen 1 päätöksien vaikutus - osa työvoimasta on edelleen tuotteen 1 kimpussa.



Kuva 2-IV. Kolmen tuotteen suunnitteluhorisontti.

2.4.1 Monen tuotteen SDR/CPM -malli vs. varastomalli

Suunnitteluhorisontteineen malli muistuttaa monessa suhteessa monikautista varastomallia. Varastoitavia tuotteita edustaa mallissamme työvoimatilanne eri työvoimalajeissa. Varastomallin kautta vastaa yksi tuote. Kummassakin mallissa on yhtenä tavoitteena varastonvaihtelujen tasoittaminen. Malleille on lisäksi yhteistä, että kumpikin näkee "maailmanlopun" suunnitteluhorisontin lopussa: varastomalli pyrkii horisontin päätteeksi tyhjentämään varastot, tutkielman malli taas potkii työvoiman pois viimeisen tuotteen valmistuttua.

Yhtäläisyys ei toki ole täydellinen. Mallissamme kappaleet voivat, toisin kuin varastomallissa kaudet, liukua toistensa päälle. Toiseksi, varastomallissa varastonvaihteluja tarkkaillaan kausien rajoilla. Tutkielman mallissa työvoiman vaihteluja ei tarkailla tuotteiden rajoilla, vaan viikoittain, kuukausittain, tms., sen mukaan miten pieniksi yksiköiksi suunnitteluhorisontti on viipaloitu.

3. NUMEERINEN ESIMERKKI

Tässä luvussa tarkastellaan luvun 2 periaatteiden mukaan rakennetun tietokonemallin toimintaa numeerisen esimerkin valossa. Esimerkissä ratkotaan öljynporauslauttojen valmistamisen ajoitusongelmia.

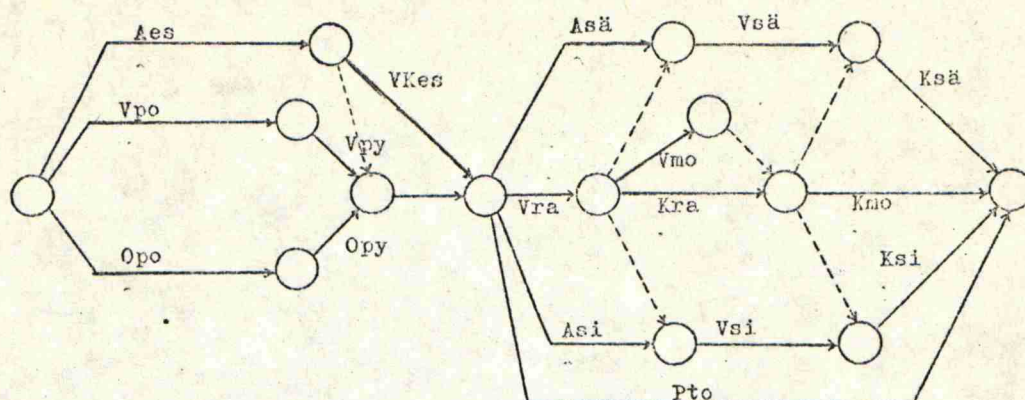
Lauttapojat Oy on tehnyt sopimuksen 10 öljynporauslautan toimittamisesta. Lautat ovat kaikki samanlaisia. Laadittu toimintakaavio on yksinkertainen, joten - tällä kertaa - voimme tarkastella tilausta kokonaisuutenakin. Tutkielman varsinainen idea oli suunnitteluhorisontin soveltaminen: nyt päästään vertailemaan erilaisten suunnitteluhorisonttien antamia tuloksia "kokonaisoptimia" vasten. (Sitaatteja selitellään lähemmin tulosten tarkastelun yhteydessä. Huomautettakoon tässä yhteydessä vain, että käytetty SDR-menetelmä ei sinänsä takaa globaalin optimin löytymistä. SDR-menetelmästä ks. luku 4.)

Toimintakaavio ja numerotiedot ovat mielikuvituksen tuotetta. Mahdolliset samankaltaisuudet todellisuuden kanssa ovat pelkkää sattumaa. Tarkoitus on vain elävöittää esimerkkiä, joka sisältää suuren joukon numerotietoa.

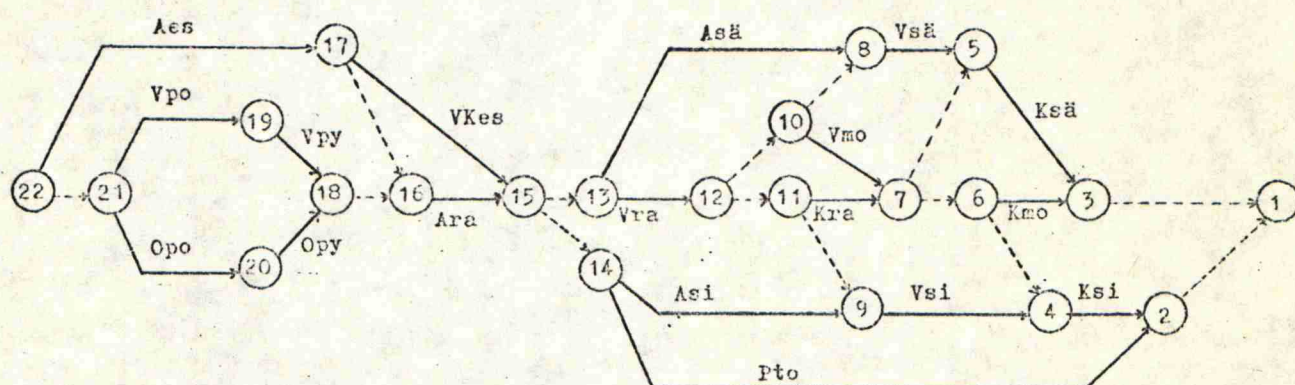
3.1 Esimerkin kuvaus

3.1.1 Toimintakaavio rajoituksineen

Kuvissa 3-I ja 3-II esitetään tilatuntyyppisen öljynporauslautan valmistusta toimintakaaviona. Taulukot 3-1...3 sisältävät toimintakaavioiden selitykset. Katkoviivoilla on kuvissa 3-I ja -II esitetty dummytehtäviä. Alkuperäisessä (3-I) kaaviossa dummytehtävät sitovat suoritusjärjestystä.



Kuva 3-1. Alkuperäinen toimintakaavio.



Lyhenne Selitys

Aes	Alakannen esivalmistelutyöt
Vpo	Vasemman ponttoonin rakentaminen
Opo	Oikean -"- -"-
Vpy	Vasemman puolen pylvästyöt
Opy	Oikean -"- -"-
VKes	Väli- ja Komentokannen rakenteiden esivalmistelutyöt
Ara	Älakannen rakentaminen
Asä	Alakannen sähkötyöt
Vra	Välikannen rakentaminen
Asi	Alakannen sisustustyöt
Pto	Poraustornin rakennustyöt
Vmo	Välikannen teknisten laitteiden ja moottoreiden asen- nustyöt
Kra	Komentokannen rakennustyöt
Vsä	Välikannen sähköistystyöt
Vsi	Välikannen sisustustyöt
Ksä	Komentokannen sähköistystyöt
Kmo	Komentokannen teknisten laitteiden ja moottoreiden asen- nustyöt
Ksi	Komentokannen sisustustyöt

Taulukko 3-1. Aktiviteettien sanalliset selitykset.

Nro	Laji
1	"Rakennusmiehet" (pitää sisällään betoni-, hitsaus- ym. työntekijöitä)
2	Sisustusmiehet
3	Sähkömiehet
4	Laitteistoasentajat

Taulukko 3-2. Työvoimalajit.

AKT	MIS	MIH	TYOV	MAX	MIN	ALK	MIES- TYOVKT
AES	22	17	1	50	20	30	120
D	22	21					
VPO	21	19	1	60	20	40	240
OPO	21	20	1	60	20	40	240
VPY	19	18	1	70	30	50	350
OPY	20	18	1	70	30	50	350
VKES	17	15	1	50	20	30	240
D	17	16					
D	18	16					
ARA	16	15	1	160	80	120	950
D	15	13					
D	15	14					
ASA	13	8	3	50	20	50	200
VRA	13	12	1	160	80	120	1200
ASI	14	9	2	50	10	30	240
PTO	14	2	1	50	20	30	150
D	12	10					
D	12	11					
D	10	8					
VMO	10	7	4	25	15	20	180
KRA	11	7	1	160	80	120	1440
D	11	9					
VSA	8	5	3	80	20	60	470
VSI	9	4	2	60	20	40	400
D	7	5					
D	7	6					
KSA	5	3	3	80	20	60	480
KMO	6	3	4	25	15	20	180
D	6	4					
KSI	4	2	2	60	20	50	550
D	3	1					
D	2	1					

Taulukko 3-3. Toimintaverkon numerotiedot.

Työvoiman laji	Maks. määrä miehiä käytettävissä/viikko
1	300
2	120
3	120
4	30

Sakko ylityksestä/mies/viikko = 900 000 rahaa.

Taulukko 3-4. Työvoiman riittävyysrajoitus.

Mallia varten dummytehtäviä on lisätty. Käytetty kriittisen polun laskeva ohjelma vaatii, että yhteen solmuun päättyy ja yhdestä solmusta alkaa enintään kaksi aktiviteettia. Tehtäväinkulku on kaavioissa 3-I ja -II täysin sama.

Solmujen numeroinnissa on samoin otettu huomioon ohjelmiston vaatimus, että koko toimintakaavion viimeinen solmu on nro 1, ja ensimmäinen solmu kantaa suurinta numeroa. Muualla numerointi on vapaa.

Kriittiset solmut ovat solmut nrot 15 ja 7. Esimerkissä siis Välikannen rakenteiden ja Komentokannen rakenteiden työt eivät voi olla käynnissä kahdella lautalla yhtäaikaa. Muuten valmistusprosessien päällekkäin liukuminen on mahdollista sikäli kuin muut rajoitukset periksi antavat.

Esimerkkimme dummytehtävät ovat sen luonteisia, että ne ainoastaan sitovat suoritusjärjestyistä, ilman että niihin kuluisi yhtäkään aikayksikköä. Taulukossa 3-3 voisi dummytehtävänkin kohdalla luku sarakkeessa "Miestyöviikot". Tällöin luku sellaisenaan kuvaisi kuluvaa aikaa. Tämän tyyppinen aktiviteetti voisi olla vaikka sementin kuivumisen odottelemisen, tms.

Dummyt mukaanlukien aktiviteetteja on 32 kpl. Päätösmuuttujia tulee siis muodollisesti $32+1 = 33$ kpl lauttaa kohti. Dummytehtäviä vastaavat päätösmuuttujat ovat kuitenkin valemuuttujia, niiden arvo on sidottu nolaksi. Todellisia päätösmuuttujia jää näin ollen $33-14 = 19$ kpl/lautta.

3.1.2 Kustannusfunktio

Luvussa 2 mallilla mainittiin olevan kaksi ristiriitaista tavoitetta: mahdollisimman tasainen työvoiman käyttö sekä tuotteiden valmistumisen jouduttaminen. Työvoiman käytön tasaisuutta mittaavat työhönotto- ja erotuskustannukset,

joita siis pyritään minimoimaan. Esimerkissä työhönottokustannuksiksi asetetaan 4000 rahaa/erotettu mies/viikko, erotuskustannuksiksi 6000 rahaa/erotettu mies/viikko. (Mikä tahansa funktionaalinen riippuvuus on mahdollinen. Myöhemmin kokeillaan paraabelifunktiotakin.) Samat lukuarvot pätevät kullekin työvoimalajille.

Valmistumishetkeä pyritään manipuloimaan hyvityksillä ja sakoilla. Niitä varten tarvitaan tavoitepäivämäärät valmistumiselle. Ne saadaan paremman puutteessa seuraavalla tavalla: Oletetaan, että kunkin 10 lautan alkuperäinen miehityssuunnitelma on Taulukon 3-3 mukainen. Kun nyt kukin lautta ajoitetaan aloitettavaksi aikaisimpana mahdollisena hetkenä (otetaan huomioon kriittisten solmujen vaatimukset) ja lasketaan verkon läpimenoaika, saadaan tavoiteaika kunkin lautan valmistumiselle.

Yhden tuotteen läpimeno vie Taulukon 3-3 miehityksillä 53.9 viikkoa. Aloitushetikiksi saadaan (mallin avulla) 0, 22, 44, ... , 176 ja 198. Tavoitevalmistumishetket ovat tällöin 53.9, 75.9, 97.9, ... , 229.9 ja 251.9.

Sakkokertoimeksi asetetaan 300 000 rahaa/myöhästytty viikko, hyvityksiksi puolestaan 100 000 rahaa/voitettu viikko. Nämä arvot pätevät kullekin 10 lautalle.

Kustannusfunktion välityksellä otetaan huomioon myös ulkoiset rajoitukset, tässä työvoiman riittävyysrajoitus. Rajoituksen ylittämisestä rangaistaan Taulukon 3-4 mukaisesti.

3.2 Tuloksia koeajoista

Taulukoissa 3-5 ja 3-6 on pähkinänkuoressa tulokset 10 optimointiajon tuloksista alkutilanteeseen verrattuina. Alkutilannehan saatiin siten, että kaikki 10 lauttaa miehitettiin Taulukon 3-3 mukaisesti. Menettelystä seuranneet valmistumishetket asetettiin tavoitevalmistumisajoiksi, joiden ylittämisestä sai sakkoa, ja alittamisesta hyvitystä (=negatiivinen kustannus).

Ajoissa sovellettiin suunnitteluhorisontteja 2...10. Malli lähtee siitä, että jos kerran samanaikaista valmistusta esiintyy, suunnitteluhorisontin tulee olla vähintään 2. Toteutettaviin päätöksiin kuuluu näet myös se hetki, jota aikaisemmaksi seuraavan tuotteen aloitusta ei voida si-joittaa.

Taulukoissa esiintyy myös sarake "Kokonaisoptimi". Esimerkin suppeuden vuoksi koko 10 lautan tilausta voitiin tarkastella myös sellaisenaan, ja optimoinnin päätökset lyötiin lukkoon koko lauttajoukolle yhdellä kertaa. Suunnitteluhorisonttia soveltavissa ajoissahan Luvussa 2 kerrotulla tavalla vain ensimmäisen lautan päätökset toteutettiin, loput horisontin lautat olivat suunnittelun perspektiiviä varten. Seuraavaa lauttaa varten malli käynnisti uuden optimointikierroksen, toteutti taas vain ensimmäisen lautan päätökset, ja toisti tämän kaikkiaan 10 kertaa. Näin matkittiin tilannetta, jossa optimointikierrosten välillä olisi ollut tauko, ja toisaalta olisi vallinnut täydellinen ennakkotietämys.

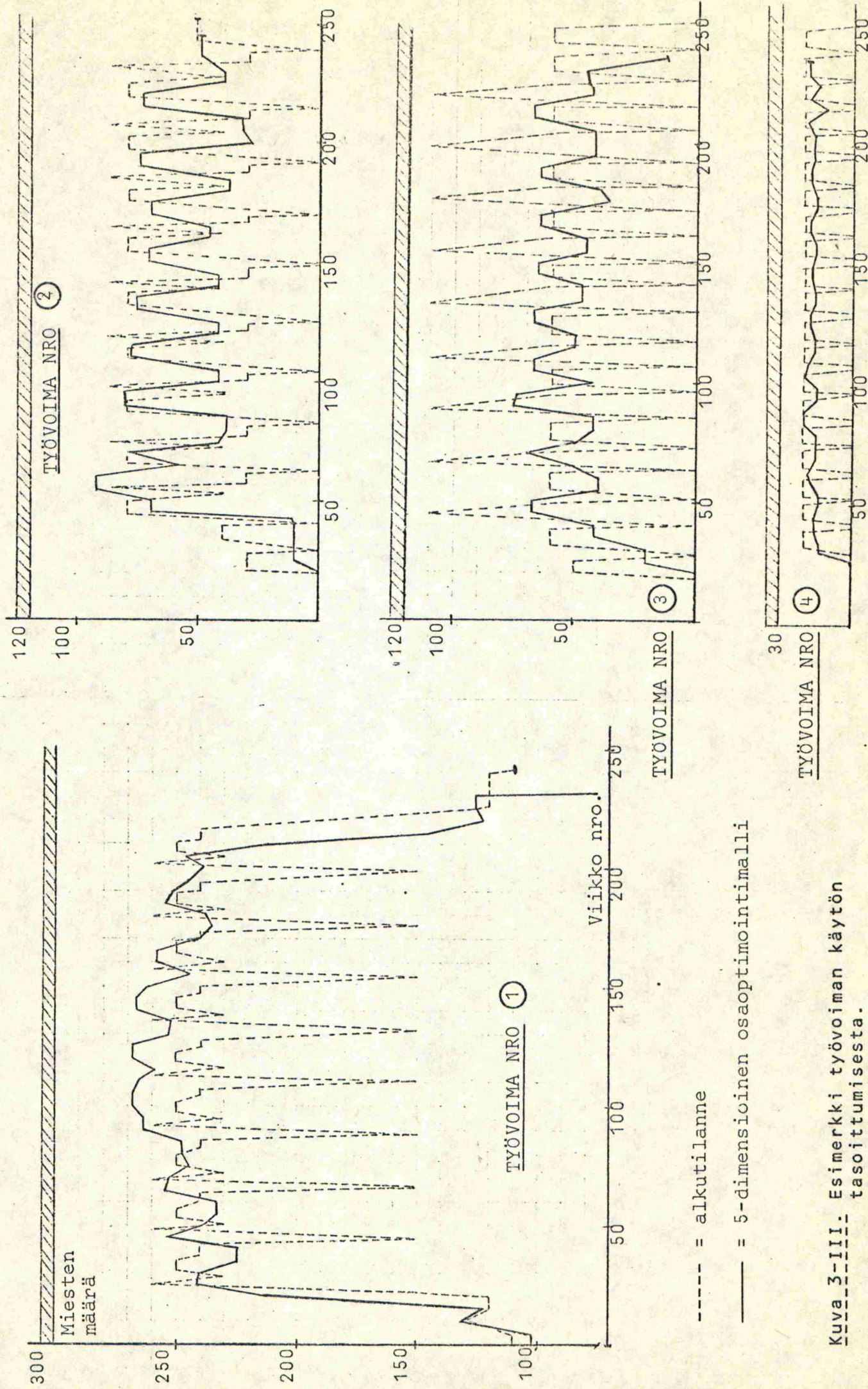
Taulukosta 3-5 havaitaan, että jokainen optimointiajo pystyy tasoittamaan työvoimavaihteluja. "Kokonaisoptimin" työhönotto- ja erotuskustannukset ovat vain noin neljänneksen alkutilanteen vastaavista. (Kuvassa 3-III on graafinen esimerkki työvoiman määrän vaihteluista alkutilanteessa sekä 5-dimensioisen mallin kyvystä tasoittaa niitä.)

KUSTANNUS- LAJI	ALKU- TIL.	'KOK. OPT.'	OPTIMOINTI	LAUTTA KERRALLAAN,	SUUNN.	HORIS.	= 2...	10:
			2	3	4	5	6	7 8 9 10
TYÖHÖNOTTO	19110	5043	11558	10086	7672	5160	6406	6811 8093 9575 7066
EROTUS	28665	7564	17337	15130	11508	7740	9610	10216 12139 14363 10598
HYVITYKSET	0	-398	-1871	-610	-792	-5779	-3638	-4814 0 -348
SAKOT	0	5206	25354	4062	1887	2473	121	0 14573 13666 6494
YHTEENSA	47775	17415	52378	28668	20275	9594	12499	12213 34805 37604 23810
(0%) (64%) (-10%) (40%) (58%) (80%) (74%) (27%) (21%) (50%)								

Taulukko 3-5. Vertailuaajojen kustannusten yhteenvedo. (Luvut 1000:nsia rahayksikköjä.)

LAUTTA NRO	'KOK. OPT.'	OPTIMOINTI	LAUTTA KERRALLAAN,	SUUNN.	HORIS.	= 2...	10:
		2	3	4	5	6	7 8 9 10
1	-2	4	2	-3	-8	0	0 -2 -2
2	-2	6	2	-1	1	0	0 -3 -2
3	-2	7	1	0	2	0	1 -4 -6
4	-2		0	0	4	0	2 -3 -5
5	-2	-5	-1	0	6	1	3 -4 -5
6	-2	-6	-4	-2	7	3	5 -2 -5
7	-2	-8	-1	0	8	5	7 -2 -2
8	-1	-11	-3	3	9	6	9 0 -3
9	0	-14	0	0	8	8	10 -8 -6
10	3	-17	-1	2	8	9	7 -15 -4
		-20					

Taulukko 3-6. Lauttakohtaiset poikkeamat tavoitevalmistusaisakoihin verrattuna. (Luvut viikkoja, pyöristettyinä lähimpään kokonaislukuun.)



Kuva 3-III. Esimerkki työvoiman käytön tasoittumisesta.

Sen sijaan valmistumishetkien säätelyssä menestys vaihtelee, mistä pääasiassa johtuu, että kokonaistulos vaihtelee alkutilannetta 10% huonommasta (malli 2-dimensioisena) aina 80% parempaan (dimensio = 5).

Miksi sitten "Kokonaisoptimi" ei olekaan kokonaisuuden kannalta paras tulos? Jos kyseessä olisi analyttinen optimointimenetelmä, pitäisi ilman muuta saada paras tulos silloin, kun optimoidaan kokonaisuutta. Nyt sen sijaan osaoptimointimalli dimensioilla 5...7 ajaa reilusti ohi.

Optimointimetodina käytetty SDR (ks. 4.1) on luonteeltaan heuristinen, eikä siis takaa globaalista optimia. Kappaleessa 2.1.2 käsitelty aloitusaikamuuttuja näkyy sitovan mallin käsiä liian kanssa, sillä mitä myöhempanä horisontissa tuote on, sitä vähemmän vastaavilla päätösmuutujilla on valtaa ja vaikutusta. Jos sen sijaan vaikka jostain syystä päätetään siirtää tuotteen 1 aloitusta, siirtyvät kaikkien muidenkin tuotteiden aloitusajat vastaavasti. Tämä tekee sitten tyhjäksi dimension kasvatuksesta saatavat edut 7:n tuotteen jälkeen, 8- ja 9-dimensioisena malli menestyy yllättävän surkeasti.

Malli toimii sikäli johdonmukaisesti, että 10 lautan kokonaisoptimointiajo ja osaoptimointiajo dimensiolla 10 ovat kustannuksiltaan ja valmistumishetkiltään pitkälle yhdenmukaiset. Tulosten ero ($= 14\% = 64\% - 50\%$) johtuu siitä, että iteraatiokertojen määrä - jolla on merkitystä SDR-rutiinin antamalle tulokselle - rajoitettiin 1000:ksi kaikissa muissa tapauksissa paitsi kokonaisoptimointiajossa, jossa iteratioita sallittiin peräti 10 000. Itse asiassa kokonaisoptimointiajo oli 1000:n iteratian jälkeen 4% huonommassa tuloksessa kuin mihin 10-dimensioinen "kaima" päätyi. Osaoptimointiajo pystyi jälkikäteen parantamaan asemiaan siitä, millaisena se näki tulevaisuuden 1. kierroksen jälkeen, vaikka 2. kierroksesta lähtien horisontin loppupäähän alkoi kertyä olemattomia tuotteita. Malli näet tähyili jatkuvasti 10 lautan verran eteenpäin. Sen sijaan edes mahtava iteratioiden määrä ei pystynyt tekemään "Kokonaisoptimista" parasta, edellä mainituista syistä.

Tuloksista käy selvästi ilmi kyllin pitkän suunnittelu-horisontin tarpeellisuus. Varsinkin 2-, osittain myös 3-dimensioisena malli lähtee ahneesti liikkeelle, ja ensimmäiset 3 lautta valmistuvat reippaasti aikataulua edellä. Sitten 2-dimensioinen malli lyö päänsä työvoimakattoon, ja lopun aikaa se on vaikeuksissa jääden koko ajan jälkeen tavoiteajoista. (Työvoimakäyriä ei ole viitsitty piirtää kaikista ajoista. Jäljempänä on kuitenkin vakuuttava esimerkki työvoimarakoituksen efektiivisyydestä.)

Esimerkissä on keskimäärin 3 lautta samanaikaisessa valmistuksessa. Tässä tapauksessa osoittautuu parhaaksi ulottaa suunnittelu keskimäärin kaksinkertaiselle määrälle lauttoja (parhaat tulokset 5-, 6- ja 7-dimensioisilla malleilla).

Mielenkiintoisena yksityiskohtana kiinnittyy huomio kilpailun kiistattoman voittajan, 5-dimensioisen mallin käyttäytymiseen. Se viivyttää ensimmäisen lautan valmistumista peräti 8 viikkoa tavoitteesta, mutta samalla avautuu tie kaikkien loppujen lauttojen aiottua varhaisempaan valmistumiseen. Taktikka osoittautui tällä kertaa pistämättömäksi.

3.2.1 Työvoimarakoituksen merkitys

Kuvasta 3-III saa ensi silmäyksellä sen käsityksen, että työvoimarakoitus ei ole efektiivinen rajoitus, vaan sitä voitaisiin kiristää ilman tulosten muuttumista. Käsitys on väärä. SDR-mallit eivät ole yhtä yksioikoisia kuin analyttiset mallit. Taulukoissa 3-7 ja -8 on tulokset 4-dimensioisen mallin ajoista alkuperäisellä sekä $\pm 33\%$ muutetuilla työvoimarakoitusvektoreilla. Rajoitukset ovat siis (300, 120, 120, 30), (400, 160, 160, 40), sekä (200, 80, 80, 20).

T Y Ö V O I M A R A J O I T U S :			
	ALKUPER.	HÖLLENN.	KIRIST.
TYÖHÖNOTTO	7672	5191	11176
EROTUKSET	11508	7786	16763
HYVITYKSET	-792	-10914	-80
SAKOT	1887	223	64000
	-----	-----	-----
YHTEENSA	20275	2286	91859

Taulukko 3-7. Työvoimarajoituksen vaikutus 4-dimensioisessa mallissa. Kustannukset.

T Y Ö V O I M A R A J O I T U S :			
LAUTTA NRO	ALKUPER.	HÖLLENN.	KIRIST.
1	-3	-1	-4
2	-1	1	-1
3	0	2	1
4	0	6	-6
5	0	8	-11
6	-2	11	-15
7	0	15	-35
8	3	18	-34
9	0	22	-52
10	2	25	-58

Taulukko 3-8. Työvoimarajoituksen vaikutus 4-dimensioisessa mallissa. Poikkeamat tavoitevalmistumishetkissä.

Työvoimarajoituksella osoittautuu olevan ratkaiseva merkitys. Kun työvoimarajoitusta höllennetään, 4-dimensiainen malli pystyy parempaan tulokseen kuin yksikään Taulukon 3-5 tulos. Suurin hyöty koituu valmistumisen jouduttamisesta hyvitysten muodossa, mutta myös työvoiman muutoskustannukset putoavat jokseenkin tarkkaan kolmanneksen verran, ja vetävät vertoja parhaille tuloksille Taulukossa 3-5. Kun sitten työvoimarajoitusta kiristetään saman verran, tulokset ovat nähdyn laiset.

3.2.2 Hyvitysten ja sakkojen vaikutus valmistumishetkiin

Hyvityksillä pyrittiin kannustamaan lauttojen valmistumista tavoitepäivämäärää ennen, sakoilla rangaistiin, jos tavoitteessa ei onnistuttu. Taulukoissa 3-9 ja 3-10 on esimerkit siitä, mikä vaikutus on hyvitysten ja sakkojen painotuksen muuttamisella $\pm 50\%$.

LAUTTA NRO	HYVITYKSET/SAKOT:		
	ALKUP.	+50%	-50%
1	-8	0	-4
2	1	2	-2
3	2	4	0
4	4	5	0
5	6	7	-8
6	7	4	-12
7	8	5	-24
8	9	4	-24
9	8	-1	-22
10	8	0	-20
<hr/>			
	Σ +45	+30	

Taulukko 3-9. Poikkeamat tavoitevalmistumisajoissa. 5-dimensioinen malli.

LAUTTA NRO	HYVITYKSET/SAKOT:		
	ALKUP.	+50%	-50%
1	0	1	-4
2	0	3	-1
3	0	4	-1
4	0	5	-1
5	1	7	-2
6	3	8	-2
7	5	10	-6
8	6	11	-5
9	8	12	-4
10	9	3	-6

Taulukko 3-10. Poikkeamat tavoitevalmistumisajoissa. 6-dimensioinen malli.

Taulukon 3-10 tulokset ovat selkeät. Kun valmistumishetkille pannaan lisää painoa, ne myös saadaan aikaisemmiksi (lukuunottamatta lautan 10 "kauneusvirhettä"), ja päinvastoin.

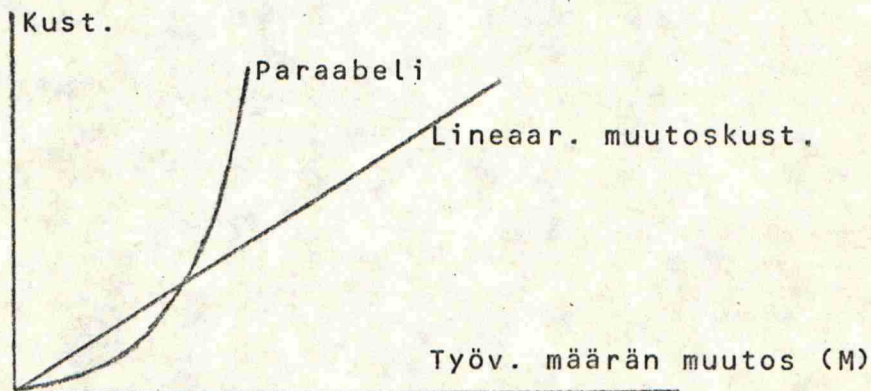
Sen sijaan 5-dimensioisen mallin osalta houkutukset eivät tehonneet. Vaikuttaa hyvältä onnelta, että 5-dimensioisena malli saavuttaa parhaat tulokset niin tässä tapauksessa kuin myös Taulukon 3-5 vertailuajoissa. Tähän viittaa myös erikoinen ratkaisu viivyttää alkuperäisessä tapauksessa ensimmäisen lautan valmistusta peräti 8 viikkoa, mitä missään muussa tapauksessa ei esiinny.

Hyvitysten ja sakkojen painotuksen vähentäminen vaikutti myös 5-dimensioisessa tapauksessa lauttojen valmistumisen viivästymiseen.

3.2.3 Paraabelikäyrä työvoiman muutuskustannusten mittana

Työvoiman muutuskustannukset ovat luonteeltaan vastakkaiset myöhästymissakoille ja aikaisen valmistumisen hyvityksille. Siksi ei tässä yhteydessä kokeilla niiden parametriarvojen muuttamista. Sen sijaan kokeillaan 3 eri paraabelikäyräparia työvoiman muutuskustannuksina.

Lineaarisen ja parabolisen käyrän käytöllä on se ero, että paraboli antaa leikkauspisteen vasemmalla puolen (ks. Kuva 3-IV) pienemmät kustannukset, ja sen oikealla puolella suuremmat kustannukset kuin lineaarinen käyrä.



Kuva 3-IV. Lineaarinen vs. parabolinen työvoiman muutuskustannus.

Esimerkin paraabeliparit on valittu siten, että ne leikkaavat alkuperäisen lineaarisen kustannuskäyrän kohdissa muutos, merkitään M , = 10, 20 ja 40. Kustannuskäyrien yhtälöt on

lueteltu Taulukossa 3-11.

	<u>Työhönottokust.</u>	<u>Erotuskust.</u>
Alkuper.	4000M	6000M
P10	1000M + 300M ²	2000M + 400M ²
P20	1000M + 150M ²	2000M + 200M ²
P40	1000M + 75M ²	2000M + 100M ²

M = työvoiman määrän muutos, siirryttäessä viikolta
n viikolle n + 1

Taulukko 3-11. Erilaisia työvoiman muutuskustannusten käyriä.

	TYÖVOIMAN MUUTOSKUSTANNUKSET:			
	ALKUP.	P10	P20	P40
TYÖHÖNOTTO	6406	11842	8565	4098
EROTUKSET	9610	16514	11736	6391
HYVITYKSET	-3638	-92	-980	-1032
SAKOT	121	1261	385	317
	-----	-----	-----	-----
YHTEENSÄ	12499	29524	20686	10806

Taulukko 3-12. Erilaisten työvoiman muutuskustannusten vaikutus kokonaistulokseen. Dimensio = 6.

	TYÖVOIMAN MUUTOSKUSTANNUKSET:			
	ALKUP.	P10	P20	P40
LAUTTA NRO				
1	0	-1	-1	-1
2	0	-1	1	0
3	0	0	1	1
4	0	0	1	1
5	1	0	1	1
6	3	-1	1	1
7	5	-1	2	1
8	6	0	2	2
9	8	-1	2	2
10	9	-1	2	1

Taulukko 3-13. Poikkeamat tavoitevalmistumishetkistä. (Huom. pyöristys.)

Käyriä kokeiltiin mallin dimensiolla = 6. Taulukko 3-13 viittaa siihen, että alkuperäinen lineaarista muutuskustannusta soveltava ajo saavuttaa hyvän menestyksensä valmistumisaikojen jouduttamisessa säilimällä suurempia työvoimanvaihteluja kuin 40 miehen muutos/viikko. Taulukon 3-12 mukaan malli pystyy painamaan työvoiman vaihtelut välille 20...40, jolloin päästään pienempiin työvoiman muutokustannuksiin kuin alkuperäisessä ajossa. Sen sijaan ei ole mahdollista tasoittaa vaihteluja alle 20:n.

4. MALLITEKNIIKKAA

Tässä luvussa selvitetään mallin teknistä ratkaisua. Ensin käydään läpi SDR-mallien yleisiä perusteita. Sitten tarkastellaan tutkielman mallin erikoisongelmia ja niiden ratkaisua.

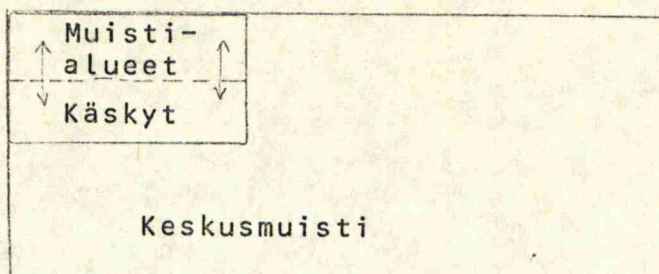
Mallin optimointimenetelmä, "Search", lienee täälläpäin melko tuntematon: siksi pari sanaa itse menetelmän perusteista tässäkin yhteydessä. SDR-menetelmää sovelletaan FORTRAN-ohjelmoinnin kautta. Muistin virkistämiseksi tuodaan esille mallin struktuurin ymmärtämiseksi tarvittava määrä FORTRAN-ohjelmoinnin perusteita.

4.1 Ratkaisun metodiikkaa

4.1.1 FORTRAN-ohjelmoinnin perusteiden kertausta

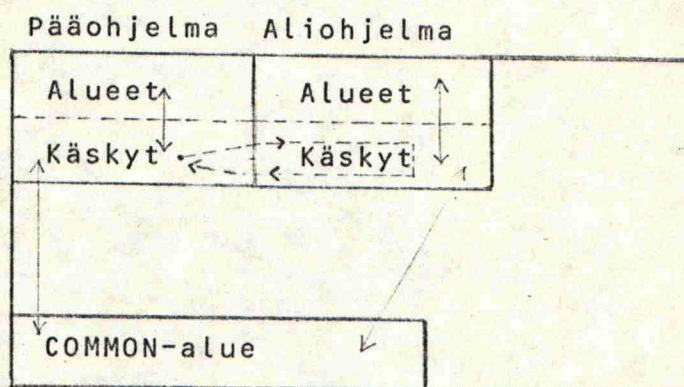
Tietokoneen toimivat konekieltensä pohjalta. Ihmiset väsäävät ohjelmansa mieluummin käyttämällä symbolisia ohjelmointikieliä, kuten FORTRANia. Kääntäjät eli käännösohjelmat muuntavat kirjoitetun FORTRAN-ohjelman konekielelle. Ohjelma koostuu periaatteessa muistialueista (muuttujat ja vakiot) sekä käskykoodista. Ohjelmakäskyt muuttelevat ja käyttävät hyväkseen muistialueen muuttujien arvoja. Käännetty FORTRAN-ohjelma näyttää tietokoneen keskusmuistissa periaatteessa Kuvan 4-1 kaltaiselta.

Ohjelmakokonaisuus voi koostua pelkästään yhdestä pääohjelmasta tai lisäksi yhdestä tai useammasta aliohjelmasta. Kullakin ohjelmamodulilla on omat muisti- ja käskyalueensa. Eri modulit voivat vaihtaa informaatiota yhteisen muisti-



Kuva 4-I. FORTRAN-ohjelma tietokoneen keskusmuistissa.

alueen, COMMON-alueen, kautta. (Kuva 4-II.) Pääohjelma kutsuu aliohjelmaa (FORTRANin CALL-lause). Tapahtuu hyppy aliohjelmaan ja aliohjelman suorituksen jälkeen paluu pääohjelmaan. Aliohjelma voi puolestaan kutsua aliohjelmaa, joka kutsuu toista aliohjelmaa, jne.



Kuva 4-II. Pää- ja aliohjelma. COMMON-alue. Aliohjelman suoritus.

4.1.2 SDR - heuristinen optimointimenetelmä

SDR on lyhenne sanoista "Search Decision Rule" (= etsi päätössääntö). SDR on yhteinen nimittäjä koko joukolle heuristisia optiminetsintäalgoritmeja. Taubert^{*)} loi yhtenäisen

^{*)} Taubert(9). SDR-menetelmästä myös kirjassa Buffa - Taubert(1), ks. esim. s. 251 ... 261.

SDR-metodologian perusteet kokoamalla tietyn samankaltaisen ajattelutavan sisällään pitävät algoritmit saman katon alle.

Heuristisen optimointimenetelmän soveltaminen tulee tietysti kysymykseen vasta, kun muut keinot eivät enää tepsii; analyttiset menetelmät, kuten lineaarinen tai dynaaminen optimointi, ovat ongelman ratkaisuun epäsoveliaita. Niitä on joko työlästä soveltaa, tai sitten tehtävät yksinkertaistukset vievät liian kauaksi todellisuudesta.

4.1.2.1 Search-rutiinin toiminta

SDR-algoritmit voidaan luokitella sen mukaan, mikä on niiden lähestymistapa seuraavaan kysymyksenasetteluun: kun i :nnen iteraation jälkeen päätösmuuttujavektorilla on tietty arvojoukko, niin

- 1 - mikä on seuraavan muutoksen suunta?
- 2 - kuinka kauas muutoksen tulisi yltää annetussa suunnassa?

Algoritmi saattaa perustaa vastauksensa gradientin mukaiseen "vuorensinämaan kiipeämiseen", tai jopa umpimähkäisesti valittuun suuntavektoriin, tai johonkin välimuotoon näiden kahden ratkaisutavan laajalta väliltä. Yhtälömuodossa iterointiprosessia voidaan kuvata seuraavasti:

$$D_{i+1} = D_i + \lambda_i P_i$$

jossa D_i on n -dimensioinen päätösvektori i :nnen iteraation jälkeen, λ_i on positiivinen vakio, ja P_i n -dimensioinen suuntavektori i :nnen iteraation jälkeen. Nyt siis P_i määrittää suunnan ja $\lambda_i P_i$ ilmoittaa, kuinka kauas siirtymä vie pisteestä D_i . Päätösvektorin uusi arvojoukko on siten D_{i+1} .

SDR-algoritmi saattaa siis käyttää gradienttimenetelmän periaatteita optiminhausssa. Globaalisen optimin löytymiseksi

täytyisi tällöin tavoitefunktion olla konkaavi ja luvallisten ratkaisujen alueen konvekksi^{*)}. SDR-mallit eivät näitä edellytyksiä välttämättä täytä. Niinpä SDR-rutiini pyrkii hakeutumaan optimiin useammasta alkuarvotilanteesta, globaalisen optimin löytämisen varmistamiseksi.

4.1.2.2 SDR-menetelmän soveltaminen

SDR ei siis voi taata etukäteen globaalisen optimin löytämistä. Myöskään ei voi etukäteen sanoa, mikä tarjolla olevista algoritmeista antaa parhaan tuloksen. Tässä tutkielmassa on käytetty Taubertin kehittämää "Adaptive Pattern Search" -algoritmia, jonka tehokkuutta julistetaan lukuisissa tutkimuksissa^{**)}.

Soveltavan mallin ydin on Taubertin kirjoittama FORTRAN-aliohjelma SDRMIN^{***)}. Ohjelmaa käytetään (lähes) sellaisenaan. Käyttäjä puolestaan kirjoittaa malliin pääohjelman sekä aliohjelman OBJFCT. Mallin toimintaa voidaan luonnehtia sanomalla, että pääohjelma antaa määräykset, SDRMIN ja OBJFCT tekevät työt, ja pääohjelma taas korjaa potin.

Pääohjelmassa annetaan päätösmuuttujavektorille alkuarvot sekä arvot sallittua päätösjoukkoa rajoittaville ala- ja ylärajavektoreille. Lisäksi määritellään iteraatiokertojen maksimimäärä ja päätösmuuttujavektorin dimensio. Optimointi käynnistetään sanomalla "CALL SDRMIN". Optimointiprosessin päätyttyä pääohjelma saa käyttöönsä optimaaliseksi katsotun päätösvektorin. Sen perusteella voidaan laskea ja eritellä toteutuvat kustannukset.

Aliohjelma OBJFCT = kustannus- t. tavoitefunktio. Koska tavoitefunktio on oma tietokoneohjelmansa, ja itse SDR-menetelmä ei aseta rajoituksia tavoitefunktion tyypille, on

*) Ks. Manninen - Salmi(6) s. 118.

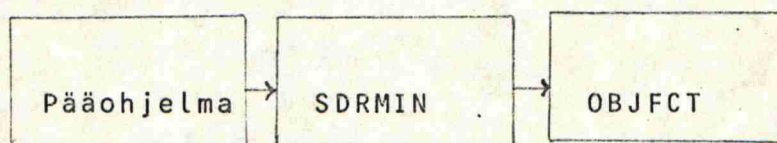
**) Jäljille pääsemiseksi ks. Buffa - Taubert(1) s. 251.

***) Ohjelmadokumentti: Buffa - Taubert(1) s. 586 ... 605.

tavoitefunktion tyyppi niin vapaa, kuin ohjelmointikielellä voi kuvata (lue: mielivaltaisen vapaa).

SDR-malli toimii siis näin: Pääohjelma aloittaa iterointiprosessin kutsumalla SDRMINiä. SDRMIN suorittaa optimipisteen hakua oman logiikkansa mukaisesti. Kunkin iteraation yhteydessä se kutsuu aliohjelmaa OBJFCT, joka laskee tavoitefunktion arvon. SDRMIN vertaa tavoitefunktion arvoa edellisen iteraation tulokseen ja tekee muutoksen suunnasta ja suuruudesta omat johtopäätöksensä. Nyrkkisäännöksi iteraatioiden määrän katolle Taubert suosittelee vähintään 2000 - valtaosa mallin ajoajasta on täten SDRMINin ja OBJFCT:n vuoropuhelua.

Pääohjelma, SDRMIN ja OBJFCT hoitavat keskinäisen kommunikointinsa COMMON-muuttujien välityksellä. COMMONiin sijoitetaan päätösvektori, rajoitusvektorit, dimensio, maksimiyrityskerrat ja tavoitefunktion arvo. SDRMINiin on sijoitettava asianmukaiset COMMON-lauseet, muuten ohjelmaa voi käyttää sellaisenaan. Harjaantunut käyttäjä voi myös yrittää vaikuttaa optimoinnin kulkuun manipuloimalla erilaisia SDRMINin parametreja. Näistä mainittakoon esimerkin vuoksi parametri, joka määrää sen prosenttisen määrän, jonka verran tavoitefunktion arvon on vähintään parannuttava, että muutos ylipäättään katsotaan parannukseksi.



Kuva 4-III. SDR-mallin hierarkia.

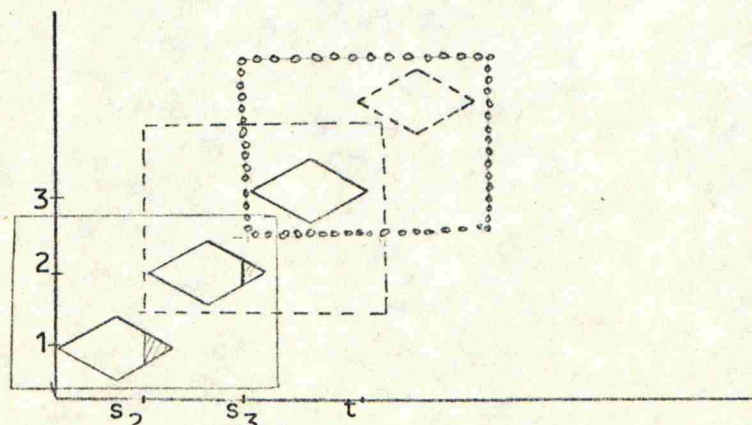
4.2 Ohjelmointinäkökohtia

4.2.1 Optimointi tuote kerrallaan

Monikautista mallia sovelletaan siten, että mallin tarjoamat päätökset toteutetaan ensimmäisen kauden osalta. Loput kaudet ovat suunnittelun perspektiiviä varten. Toisen kauden päätöksiä varten mallilla ajetaan uusi kierros. Puutteellisen ennakkotietämyksen vuoksi on ehkä arvioitu joidakin tekijöitä väärin: nyt mallin syöttötiedot korjataan todellisuutta vastaaviksi, mallilla ajetaan uusi optimointikierros, jne.

Tutkielman malli tekee annetun määrän optimointikierroksia yhdellä kertaa. Se jatkaa automaattisesti yhden kierroksen jälkeen laskemalla ensin toteutettavien päätösten synnyttämät kustannukset, ja alkaa heti uuden optimointikierroksen. Kysymys on tapahtumien jälkikäteen tarkastelusta.

Kuvassa 4-IV esitetään kolmen tuotteen kokonaistilaus, kun optimointi suoritetaan kahden tuotteen suunnitteluhorisonttia soveltaen. Ensimmäisen kierroksen tuloksena saadaan miehityspäätökset tuotteelle 1. Samalla päätetään, että tuotteen 2 aloitus ei voi tapahtua ennen hetkeä s_2 . (Tuotteen 2 toteutettavia päätöksiä varten on tehtävä uusi optimointikierros. Sitä varten jää aikaa hetkeen s_2 saakka.)



Kuva 4-IV. Optimointi tuote kerrallaan.

Tuotteen 1 viivoitettu osa on kesken tuotetta 2 aloitettaessa, joten toteutuvia työhönotto- ja erotuskustannuksia ei voida laskea vasta kuin väliltä $0 \dots s_2$. Tuotteen 1 loppuunsaattamiseen kiinnitetyt miehet muistetaan ja mallilla ajetaan yhtä kyytiä toinen optimointikierros. Nyt lyödään lukkoon tuotteen 2 miehityssuunnitelma sekä s_3 , tuotteen 3 aikaisin mahdollinen aloitusaika. Toteutuvat työhönotto- ja erotuskustannukset voidaan laskea nyt väliltä $s_2 \dots s_3$. Kolmannella optimointikierroksella tehdään tuotteen 3 miehityspäätökset. Rakennettu malli kuvittelee "haamutuotteen", tuotteen nro 4, horisonttiin, vaikka tätä ei todellisuudessa olekaan. Työhönotto- ja erotuskustannukset voidaan laskea nyt väliltä $s_3 \dots t$ eli koko projektin (3 tuotetta) loppuun saakka.

4.2.2 Moduilit

Malliin kuuluu kaikkiaan viisi ohjelmaa: normaaleja SDR-mallin osia ovat Pääohjelma sekä aliohjelmat SDRMIN ja OBJFCT. Näiden lisäksi mallin osia ovat kriittisen polun laskentaohjelma MCMGON sekä tämän ympärille rakennettu muunnosrutiini PREPAR. Näistä ovat lainatavaraa SDRMIN sekä aliohjelmaksi muunnettu MCMGON^{*)}.

Pääohjelma lukee korteilta tehtävän kuvauksen: Taulukon 3-3 tiedot + koko joukon muuta parametritietoa, mm. suunnitteluhorisontin pituuden (kappaleissa). Pääohjelma "monistaa" tiedot koko suunnitteluhorisonttia koskeviksi ja panee alkuun optimoinnin käskyllä "CALL SDRMIN". Optimin etsinnän päätyttyä pääohjelma laskee toteutuvat kustannukset ja aloittaa uuden optimointikierroksen kappaleessa 4.2.1 esitetyllä tavalla.

SDRMINin osuutta on kuvattu osassa 4.1.2. Sen logiikkaan

*) McMillan - Gonzales(2) s. 357...378; kriittisen polun laskentatekniikkaa sekä ohjelma dokumentteineen.

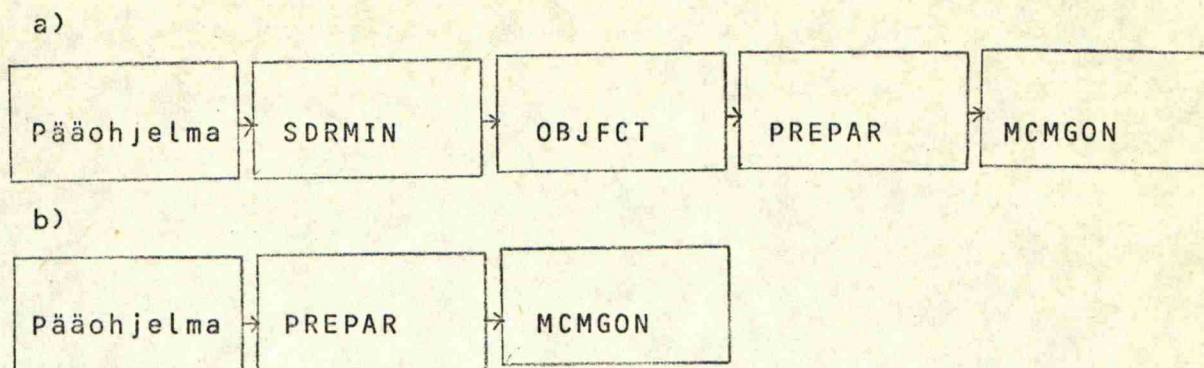
ei ole puututtu, on ainoastaan kirjoitettu muita ohjelma-moduleita vastaava COMMON- eli yhteisiä muistialueita koskeva määrittyslause.

Aliohjelma OBJFCT laskee suunnitteluhorisontin kustannukset. Se näkee suunnitteluhorisontin yhtenä kokonaisuutena: työhönotto- ja erotuskustannukset lasketaan aina ensimmäisen tuotteen alusta viimeisen tuotteen loppuun. Myös OBJFCT osaa ottaa huomioon aiempia tuotteita viimeistelemässä olevat miehet. Suunnitteluhorisontin lopussa OBJFCT näkee maailmanlopun: väki irtisanotaan.

Aliohjelmat PREPAR ja MCMGON muodostavat yhtenäisen paketin. MCMGON laskee kriittisen polun, ja samalla saadaan kutakin aktiviteettia koskevat aikatiedot (aikaisin mahdollinen aloitushetki ja kesto). Malli ajoittaa kunkin aktiviteetin alettavaksi aikaisimpana aloitushetkenä. Tämän suureen avulla miehityspäätös sijoitetaan paikalleen työvoimataulukoon (kappale 4.2.3), joka on ratkaisun kulmakiviä.

MCMGON käsittelee aikasuureita. Aktiviteettien kestot ilmaistaan miestyöviikkoina. Miehityspäätös on laatua miestä/aktiviteettiä. Niinpä PREPAR laskee alkuosassaan yksinkertaisella jakolaskulla aktiviteettien kestot viikoissa. Sen jälkeen se laskettaa koko toimintaverkkoa koskevat aikatiedot MCMGONilla. Verkon läpimenoajan ja tuotteen aloitusajan summana saadaan valmistumishetki, jota tarvitaan hyvitystä/sakkoa laskettaessa. PREPARin loppuosassa kootaan työvoimataulukko.

Sekä Pääohjelma (toteutuvat kustannukset) että OBJFCT (taivotefunktion arvo SDRMINille) käyttävät hyväkseen taisteluparia PREPAR - MCMGON.



Kuva 4-V. Ohjelmamodulien välinen hierarkia.

4.2.3 Työvoimataulukko

Koko ohjelmointiratkaisu nojaa työvoimataulukkoon. Siihen kerätään ehdotetuista päätöksistä seuraava työvoimatilanne, ja taulukon perusteella on helppo laskea erotus- ja työhönottokustannukset sekä työvoiman liikakäytön sakko.

Työvoimataulukon keräämisestä esitetään pieni numeroesimerkki (vrt. Taulukko 4-1): Aktiviteetin X kestoksi on arvioitu 12 miestyöviikkoa. Työvoiman laji on 2. SDRMIN ehdottaa aktiviteetille 4 miehen suuruista työryhmää. PREPAR laskee: kesto = $12/4 = 3$ viikkoa. MCMGON saa aktiviteetin X aikaisimmaksi aloitushetkeksi viikon 2 alun. Niinpä PREPAR lisää työvoimataulukossa viikon 2, 3 ja 4 lukuja 4:llä.

TYÖV. LAJI	VIIKKO					
	1	2	3	4	5	...
1	##	##	##	##	##	...
2	3	2	0	4	5	...
3	##	##	##	##	##	...

↓

	1	2	3	4	5	...
1	##	##	##	##	##	...
2	3	6	4	8	5	...
3	##	##	##	##	##	...

Taulukko 4-1. Työvoimataulukon kokoaminen.

Pääohjelma/OBJFCT ryhtyy laskemaan toteutuvia kustannuksia/tavoitefunktion arvoa lisättyään aputaulukosta työvoimataulukon alkupäähän aiemmin jo sidotut resurssit. Pääohjelma on kiinnostunut ensimmäisen tuotteen päätöksistä, OBJFCT koko suunnitteluhorisontista. Horisontin tuotteiden 2, 3, ... miehityslukemat tulevat - silloin kun tulevat - taulukon aloitusajan verran myöhemmään ruutuun kuin tuotteen 1 vastaavat luvut tulisivat.

Työvoimataulukossa saman rivin (= työvoimalaji) kahden vierekkäisen sarakkeen erotus = palkattujen tai erotettujen miesten määrä. Kustannusyhtälöistä saadaan välittömästi muutoksen vaikutus palkkaus/erotuskustannuksiin. Kustakin taulukon luvusta näkyy suoraan, onko annettu työvoimalajia koskeva maksimi ylitetty. (Jos toteutuviissa kustannuksissa on näitä ylityssakkoja mukana, sallittua ratkaisua ei ole löytynyt ollenkaan.)

4.2.4 ATK-teknisiä yksityiskohtia

Koko malli on ohjelmoitu FORTRAN-IV-ohjelmointikielellä. Numeerisen esimerkin ajot on suoritettu Opetusministeriön UNIVAC-1108-tietokoneella. Optimoinnin suorittaminen yhdelle suunnitteluhorisontille, kun yrityskertoja sallittiin 1000, vei keskusyksikköaikaa ("CPU-aikaa") seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$t_{\text{cpu}} = 0.89 \text{ min} + h \cdot 0.33 \text{ min} \quad *)$$

jossa $h = 2, 3, \dots, 10$ = suunnitteluhorisontin tuotteiden lukumäärä.

Kussakin koeajossa (paitsi kokonaisoptimissa) näitä kierroksia oli 10 kappaletta, ja resurssien kulutus tietysti yhtälön arvo kerrottuna 10:llä.

Mallin viisi ohjelmamodulia käsittivät kaikkiaan n. 800 ohjelmariviä. Nämä jakaantuivat omien ja lainaohjelmien kesken seuraavalla tavalla:

<u>Itse tehdyt</u>		<u>Lainaohjelmat</u>	
Pääohjelma	300 riviä	SDRMIN	220 riviä
OBJFCT	60 --	MCMGON	140 --
PREPAR	80 --		
Yht.	440 riviä		360 riviä
		800 riviä	

Taulukko 4-2. Ohjelmakoodin määrät.

Nykyisessä muodossaan malli sallii enintään 500 periodin pituisen suunnitteluhorisontin. Kappaleissa mitattuna suunn-

*) Yhtälö saatu regressiolla. Selityssaste yli 99%.

nitteluhorisontin pituus ei ole rajoitettu. Työvoimalajeja voi olla enintään 10, dummyaktiviteeteille sijoitetun "haamutyövoiman lisäksi. Päätösmuuttujien maksimimäärä on sattumalta sama kuin suunnitteluhorisontin aikaviipaleiden maksimi, 500 kappaletta.

Kuten tunnettua, ratkaisu perustuu työvoimataulukon käyttöön. Jos työvoimalajien maksimia tai periodien maksimimäärää kasvatetaan, tuntuu tämä heti voimakkaana työvoimataulukon tilatarpeen kasvuna. Päätösmuuttujien määrää on helpompi lisätä, koska tällöin kasvatettaisiin vain yksiulotteisia vektoreita. UNIVACin keskusyksikköä ei tosin ole vielä ahdettu täyteen, vaan tilaa voisi käyttää vielä ainakin 1/3-osan verran lisää. (Malli kaikkienensa käsittää vajaat 30 Ksanaa.)

Toimintaverkon aktiviteettien määrä on nykyisellään enintään 100. Jos tarvetta olisi, niin ohjelmoimalla "verkonlaskuohjelma" kokonaan uusiksi tätä määrää voisi kasvattaa tarvitsematta edes lisätilaa. Nytkin määrää voisi huoletta nostaa vaikka 500:aan. Verkonlaskuohjelman voisi ohjelmoida myös niin, ettei tarvitsisi piirrellä turhia dummytehtäviä, vaan aktiviteettiin voisi saapua enemmän kuin kaksi ja siitä voisi lähteä enemmän kuin kaksi aktiviteettia.

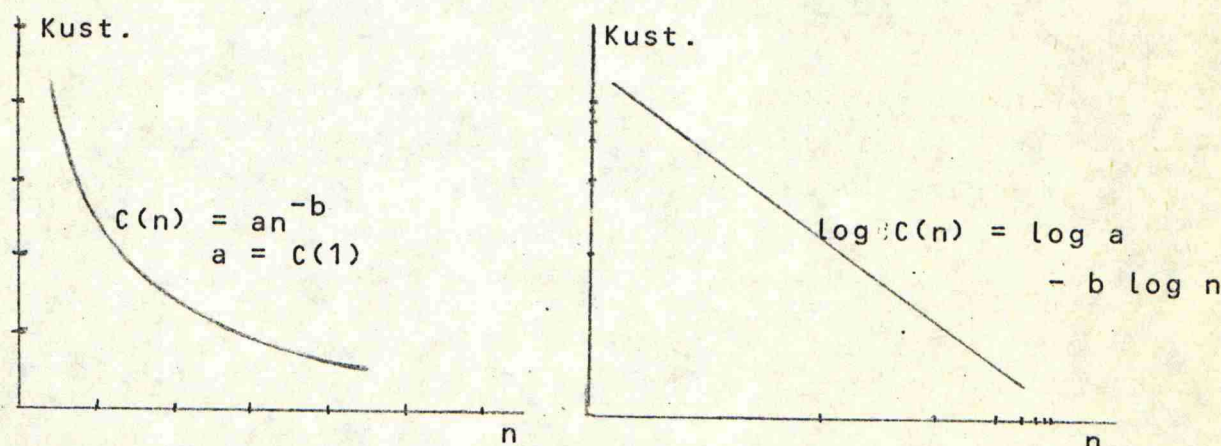
5. OPPIMISPROSESSIN HUOMIOON OTTAMINEN

Luvun 3 esimerkeissä lähdettiin siitä, että Taulukon 3-3 miestyömäärät/aktiviteetti pysyvät muuttumattomina tuotteesta nro 1 vaikka äärettömään saakka. On kuitenkin luonnollista ajatella, että tuotteita valmistettaessa aletaan selvitä yhä vähemmällä työmäärällä.

Tässä luvussa esitetään, miten oppimisprosessi voidaan ottaa huomioon mallissa yksinkertaisella tavalla. Näkökulma on edelleen mallitekkinen, eikä numerotiedoilla ole todellisuuspohjaa.

5.1 Oppimiskäyristä*)

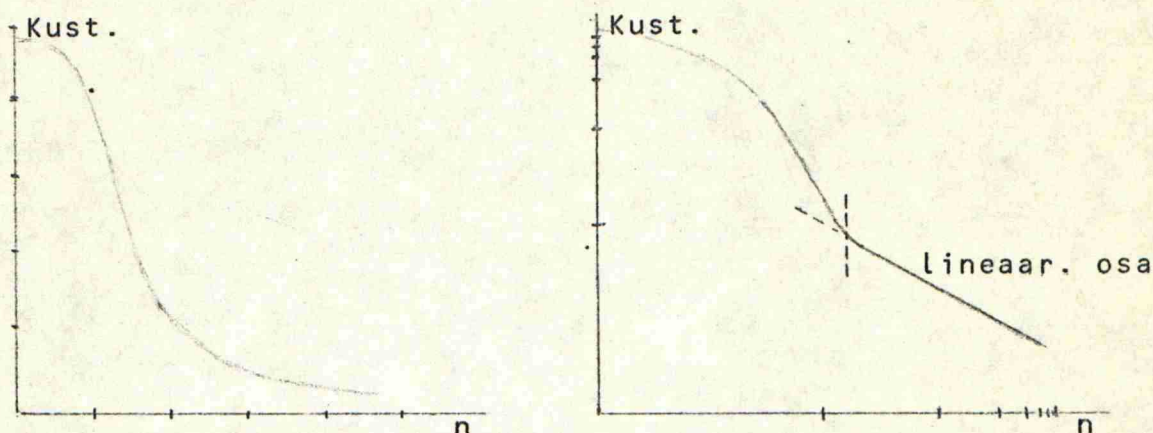
Oppimisprosessista ja oppimiskäyristä puhuttaessa viitataan yleensä ns. lineaariseen oppimiskäyrään. Tuotteen valmistuskustannusten (= tarvittava työmäärä) ja tuotteen järjestysnumeron välinen riippuvuus esitetään eksponenttifunktiona, joka linearisoi tuu logaritmiasteikolla. (Kuva 5-1.)



Kuva 5-1. Lineaarinen oppimiskäyrä.

*) Mukailee Cochrania(3).

Käyrän parametri b on positiivinen vakio, "kulmakerroin", joka määrittää oppimisnopeuden. Tuotteen valmistusta aloitettaessa on kuitenkin ensi alkuun kysymys siitä, että opetellaan, "kuinka tehdä", eikä vielä "kuinka tehdä paremmin". Oppimisprosessi lähtee pikku hiljaa käyntiin, kiihtyy sitten, ja hidastuu lopulta stabiiliin lineaariseen tapaukseen. (Kuva 4-II.)



Kuva 5-II. S-muotoinen oppimiskäyrä.

Tuotannon alkuvaiheen oppimiskäyrää sanotaan S-muotoiseksi oppimiskäyräksi, koska se muistuttaa ulkonäöltään väärin päin piirrettyä S-kirjainta.

Tuotteen valmistusajan pituus vaikuttaa oppimisnopeuteen. Jos tuotteen valmistuksessa tietty työvaihe toistuu siten, että välillä on taukoja, niin osa opeista menee hukkaan inhimillisen unohtamisen kautta.

5.2 Oppimiskertoimet

Oppimisprosessi on helposti liitettävissä malliin. Lautanrakennusesimerkissä on Taulukossa 3-3 tarvittavat miestyömäärät/aktiviteetti. Myöhempien tuotteiden luvut saadaan kertomalla ensimmäisen tuotteen vastaavat luvut kertoimella $1 \geq \text{muunnoskerroin} > 0$. Nämä luvut annetaan mallille syöttötietoina.

5.3 Numeerinen esimerkki

Oppimiskäyrän vaikutuksia kokeiltiin pienellä numeerisella esimerkillä malliin dimensioilla 4 ja 5. Vertailtavina ovat ajoparit A ja B (ks. Taulukko 5-1): A-ajoissa oppimiskäyrää ei edeltä käsin tunneta, vaan oletetaan, että seuraaviin tuotteisiin uhrattava työmäärä = viimeksi valmistuneeseen tuotteeseen uhrattu työmäärä. Toteutuvat kustannukset ovat tietysti lasketut sen mukaan, että oppimiskäyrä vaikuttaa. B-ajoissa oppimiskäyrä on tunnettu optimointia suoritettaessa.

A - EI ENNAKKOTIETOA OPPIMISKÄYRASTA
B - OPPIMISKÄYRÄ TUNNETTU ENNALTÄ

	4-A	4-B	5-A	5-B
	*)			
TYÖHÖNOTTO	8511	5268	8668	7726
EROTUS	12766	7903	13002	11589
HYVITYKSET	-20320	-25609	-22285	-25631
SAKOT	752	0	2473	0
-----	-----	-----	-----	-----
YHTEENSÄ	1709	-12439	1858	-6306
ERO	14148		8164	

*) LISÄKSI TYÖVOIMARAJOITUKSEN
YLITYSSAKKOJA

LAUTTA NRO	4-A	4-B	5-A	5-B
1	-3	4	-8	5
2	1	7	3	8
3	5	11	6	12
4	7	15	11	17
5	12	21	17	22
6	19	26	23	24
7	27	32	30	29
8	35	39	36	38
9	45	48	44	47
10	54	52	53	54
---	---	---	---	---
YHT	202	255	215	256
ERO		53		41

Taulukko 5-1. Oppimiskäyräesimerkki.

Oppimiskäyrän parametreiksi on lautoille 1 ... 10 tuulesta temmattu lukemat: 1.00 .95 .90 .86 .81 .77 .74 .70 .66 .63 . Kymmenennellä lautalla tarvittava työmäärä on jokaisessa työkohteessa siis 63% siitä mitä se oli ensimmäisellä lautalla.

Luvun 3 perusajojen lähtötiedot pidettiin muuttumattomina muilta osin kuin oppimiskäyrän lisäämisen osalta. Näin A-ajot ovat ensimmäisen optimointikierroksen jälkeen samassa tilanteessa kuin perusajot (ks. Taulukko 3-5 s.22), sillä aluksi ne ollettavat horisontin oppimiskäyräparametriksi 1.

Tuloksista näkyy ennalta selvä tulos: oppimisprosessin huomioon ottaminen paransi tulosta. 4-dimensioisena malli sai aikaan A-ajossa sen verran vääristyneen tilanteen, että se joutui matkan varrella ylittämään työvoimarajoituksen.

Oppimiskäyrätarkastelua voisi laajentaa esimerkiksi siten, että mukaan otettaisiin oppimisnopeuden ennustaminen vanhoista kustannustiedoista esimerkiksi eksponentiaalisen tasoituksen avulla. Näin pääsisi tutkimaan ennustevirheen vaikutuksia siihen verrattuna, että käytetään ennusteena viimeksi valmistuneen tuotteen lukuja.

6. YHTEENVETO

Tutkielman malli saavutti hyviä tuloksia tavoitteidensa saavuttamisessa. Suunnitteluhorisontin soveltaminen onnistui siinä määrin hyvin, että tulokset olisivat ristiriitaisia, ellei käytetty optimointimenetelmä olisi ollut SDR. (Muutamat osaoptimointiajathan suoriutuivat paremmin kuin "Kokonaisoptimi".)

Numeerisen esimerkin tulokset ovat vain suuntaa antavia, ne eivät pyri olemaan suuruutensa suhteen minkäänlaisia nyrkkisääntöjä. Esimerkissä on käsitelty yhtä ainoaa toimintaverkkoa, joka sekin oli kooltaan pieni.

SDR-menetelmästä lausutut huomiot pitävät paikkansa tämänkin tutkielman mallin osalta. Menetelmä on joustava, mutta vaatii käyttäjältään ohjelmointitaitoa.

Lopuksi muutamia tapoja parantaa ja laajentaa mallia:

1. SDR näkyy vierastavan mallin aloitusaikamuuttujaa sen nykyisessä muodossa. SDR-logiikan mukaista olisi korvata se vapaalla päätösmuuttujalla. Ei-toivotut päällekkäisyydet voisi hoidella sakkofunktioilla, aivan kuten työvoiman käytön maksimi-arvot.
2. Malliin voisi helposti lisätä päätösmuuttujasarjat ylitöitä sekä aktiviteettien joutoaikojen (engl. slack) hyväksikäyttöä varten. Kummastakin laajennuksesta tulisi lisätä yksi päätösmuuttuja aktiviteettia kohden.
3. Oppimisprosessin ennustamisen voisi liittää mukaan. Malli voisi ennustaa oppimiskäyrän arvoja tuleville tuotteille esimerkiksi eksponentiaalisen tasoituksen avulla.
4. Kriittisen polun laskentaan käytetty ohjelma edellyttää, että yhdestä aktiviteetista voi alkaa ja yhteen

aktiviteettiin voi päättyä enintään kaksi aktiviteettia. Ohjelmoimalla verkonlasku kokonaan uudelleen päästäisiin tästä rajoituksesta, ja keskusmuistitilaakin voitaisiin käyttää säästeliäämmin: käytetty ohjelma nimittäin oli tehty PERTiä varten, ja siinä oli mallin kannalta paljon tarpeetonta, turhia käskyjä ja taulukoita.

KIRJALLISUUTTA

1. Buffa E S Production-inventory Systems: Planning and
Taubert W H Control. Homewood, Ill. 1972.
2. Buffa E S "Evaluation of Direct Computer Search Methods
Taubert W H for the Aggregate Planning Problem." Industrial
Management Review, MIT Press, autumn 1967.
3. Cochran E B Planning Production Costs: Using the Improve-
ment Curve. San Fransisco 1968.
4. Jones C M Optimal Transmission and Capacity Extension
Plan for a Communication Network with a Proba-
bilistic Demand. UCLA 1969.
5. Keloharju R System Size-Methodological Simplification
Trade-off in Aggregate Production Planning.
LTA, Special Edition 2-1975, Hki.
6. Manninen J Matemaattinen optimointi, teoriaa ja tekniikkaa.
Salmi T Hki 1974.
7. McMillan C Systems Analysis: A Computer Approach to
Gonzales R F Decision Models. Homewood, Ill. 1973.
8. Sikes T W The Search Decision Rule Applied To Aggregate
Planning: Improved Efficiency and Stochastic
Extension. UCLA 1970.
9. Taubert W H The Search Decision Rule Approach to Operations
Planning. UCLA 1970.
10. Taubert W H "A Search Decision Rule for the Aggregate Sche-
duling Problem." Management Science, Vol. 14,
No. 6, 1968.

11. Taubert W H "A Case Study Problem in Aggregate Manpower Planning." Case Exercises in Operations Research, M J C Martin & R A Denison. New York 1971.
Artikkeli
12. Woolley K M Experience curves and their use in planning. Ann Arbor, Michigan 1974.

LIITE: AJOESIMERKKI

Melkein puolet mallista (ks. s. 41) on lainaohjelmistoa, joten ohjelmalistoja ei esitetä. SDRMINistä löytyy tosin täydellinen dokumentti (sivun 34 kolmas viite), mutta kriittisen polun ohjelmaa on mallia varten huomattavasti muunneltu.

Mallin osittaisesta validoinnista käy seuraava ajoesimerkki. Siinä on rekonstruoitu Buffa - Taubertin(1) sivuilla 526 ... 531 esitetty esimerkki - tosin hieman muuneltuna.

Ensinnäkin, toimintaverkkoon on lisätty pari dummy-tehtävää. Tämä on tehty mallin verkonlaskuohjelman vaatimuksesta, eikä sillä ole minkäänlaista vaikutusta tuloksiin. Sen sijaan palkkaus- ja työhönottokustannusten yhtälöitä on pitänyt muuttaa (B-T: "Hiring and Firing costs"). Sivulla 528 olevan "Hiring cost" -polynomin kahdeksannen asteen kerroin on negatiivinen, ja yhtälö saakin negatiivisia arvoja kun työvoiman muutos on > 8 . Kirjassa lienee painovirhe, sillä SDR-rutiini mieltyy kyseistä polynomia käytettäessä suuriin työvoiman muutoksiin ja saa työhönottokustannukset negatiivisiksi.

Sivulla 531 on mainittu, että tulokset ovat jotakuinkin yhtäläiset, jos muutuskustannuksina/mies/päivä käytetään yksinkertaisesti 200 dollaria "Hiring cost'ina" ja 300 dollaria "Firing cost'ina". Esimerkin tulokset ovat tämän väitteen mukaisia.

Käsitelty yhden verkon optimointi on erikoistapaus, jonka tutkielman malli pystyy hoitelemaan. Kun mukaan lisätään suunnitteluhorisontti, ja tätä paljon vielä hankalampi optimointikierrosten suorittaminen, mallin tulosten oikeiksi todistaminen on mahdotonta, kun vertailupohjaa ei ole. Mallin toimivuutta voivat todistella vain sen antamat enemmän tai vähemmän järkevät tulokset.

CPH/SDR *KYOSTI ANTTONEN -76*

ESIMERKKIAJO

- Ajokohtaisia parametreja -

NOP.....	1	LENPIR.....	1	NLCU.....	4	ISERCH.....	NO	IGLOBL.....	NO
MAYALC.....	30	4	8	10					
BNS 1.....	2.	2.	0.	0.	0.	0.			
BNS 2.....	3.	2.	0.	4.	2.	0.			
BNS 3.....	4.	0.	0.	5.	20.	0.			
BNS 4.....	5.	2.	0.	0.	0.	0.			
BNS 5.....	6.	4.	0.	8.	2.	0.			
BNS 6.....	7.	24.	0.	0.	0.	0.			
BNS 7.....	9.	18.	0.	10.	15.	0.			
BNS 8.....	9.	0.	0.	11.	45.	0.			
BNS 9.....	12.	2.	0.	13.	4.	0.			
BNS 10.....	11.	30.	0.	0.	0.	0.			
BNS 11.....	14.	0.	0.	0.	0.	0.			
BNS 12.....	13.	0.	0.	17.	140.	0.			
BNS 13.....	14.	0.	0.	0.	0.	0.			
BNS 14.....	15.	2.	0.	0.	0.	0.			
BNS 15.....	16.	4.	0.	0.	0.	0.			
BNS 16.....	17.	30.	0.	0.	0.	0.			
BNS 17.....	0.	0.	0.	0.	0.	0.			
NACTS.....	23	NACTS1....	24	IDI1.....	24				
IACHTM	IFRO	INTO	LCLA	XMAX	XMIN	X			
1	17	16	1	5.	1.	3.			
2	17	12	4	15.	2.	5.			
3	16	15	3	4.	1.	2.			
4	15	14	1	3.	1.	2.			
5	14	13	0	0.	0.	0.			
6	14	11	0	0.	0.	0.			
7	13	12	0	0.	0.	0.			
8	13	9	3	3.	1.	2.			
9	11	10	0	0.	0.	0.			
10	11	8	0	0.	0.	0.			
11	12	9	4	2.	2.	2.			
12	9	8	0	0.	0.	0.			
13	9	7	4	8.	1.	3.			
14	10	7	1	7.	2.	3.			
15	8	5	1	3.	2.	2.			
16	7	6	1	7.	3.	4.			
17	6	5	2	4.	2.	2.			
18	5	4	1	3.	2.	2.			
19	5	3	1	6.	2.	5.			
20	4	3	0	0.	0.	0.			
21	4	2	1	3.	2.	2.			
22	3	2	3	3.	1.	2.			
23	2	1	4	3.	1.	2.			

- Toimintaverkon kuvausta -

PAY.....	40.	32.	36.	28.	} Kustannuskertoimet
HC.....	.0000		200.0000		
FC.....	.0000		300.0000		
EC.....	500.				
BC.....	200.				
PC.....	500.				
ICTEV1....	17	ICTEV2....	17	— Kriitt. solmut - ei merkitystä tässä tapauksessa	

TAXTRY= 1000

TARGET.... 65.0

Tilanne lähtöarvoilla:

PROJECT NO. 1

STPAY.....	8904.	CSTPAY....	8904.
HIREC.....	6400.	CHIREC....	6400.
FIPEC.....	9600.	CFIREC....	9600.
EXDC.....	0.	CEXDC.....	0.
BONUS.....	0.	CBONUS....	0.
PENAL.....	0.	CPENAL....	0.
TOTAL.....	(*24903.	CTOTAL....	24903.

TAIL 1... 1	.0
TARGET 1... 1	65.0
ACTUAL 1... 1	65.0
START 1... 1	.0
CRIT1.....	.0 SIFT1..... .000

*) Buffa - Taubert(1) s. 530:

25 267 => 20 880

Tilanne optimoinnin jälkeen:

STPAY.....	8904.	CSTPAY....	8904.
HIREC.....	4590.	CHIREC....	4590.
FIPEC.....	6836.	CFIREC....	6836.
EXDC.....	0.	CEXDC.....	0.
BONUS.....	-323.	CBONUS....	-323.
PENAL.....	0.	CPENAL....	0.
TOTAL.....	(*20057.	CTOTAL....	20057.

TAIL 1... 1	.0
TARGET 1... 1	65.0
ACTUAL 1... 1	63.4
START 1... 1	.0
CRIT1.....	.0 SIFT1..... .000